

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL

NICOLLAS GABRIEL ASSUNÇÃO E SOUZA

MAPEAMENTO DE RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM PARQUES,
A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

UBERLÂNDIA
2022

NICOLLAS GABRIEL ASSUNÇÃO E SOUZA

MAPEAMENTO DE RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM PARQUES,
A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz de Paula Santil

UBERLÂNDIA
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S729m Souza, Nicollas Gabriel Assunção e, 1994-
2022 Mapeamento de risco de incêndios florestais em parques, a partir de
análise multicritério [recurso eletrônico] / Nicollas Gabriel Assunção e
Souza. - 2022.

Orientador: Fernando Luiz de Paula Santil.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.5373>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Qualidade ambiental. I. Santil, Fernando Luiz de Paula, 1964-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Qualidade Ambiental. III. Título.

CDU: 574

Glória Aparecida
Bibliotecária - CRB-6/2047



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Qualidade Ambiental (PPGMQ)				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 10/2022, PPGMQ				
Data:	30 de setembro de 2022	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	12012MQA011				
Nome do Discente:	NICOLLAS GABRIEL ASSUNÇÃO E SOUZA				
Título do Trabalho:	MAPEAMENTO DE RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM PARQUES, A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO				
Área de concentração:	Meio Ambiente e Qualidade Ambiental				
Linha de pesquisa:	Gestão e Monitoramento Ambiental				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Sem vinculação				

Reuniu-se por meio de web conferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ), assim composta: Prof. Dr. Fernando Luiz de Paula Santil (Orientador); Prof.ª Dr.ª Tatiane Assis Vilela Meireles (UFU) e a Prof.ª Dr.ª Ana Paula Marques Ramos (UNIOESTE).

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Fernando Luiz de Paula Santil, apresentou a Comissão Examinadora, o candidato e agradeceu a presença do público; em seguida, 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 PPGMQ.

Após a exposição, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato: **Aprovado**. 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 PPGMQ, 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 e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Luiz de Paula Santil, Presidente**, em 01/10/2022, às 10:12, 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 **Tatiane Assis Vilela Meireles, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/10/2022, às 10:15, 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 **Ana Paula Marques Ramos, Usuário Externo**, em 03/10/2022, às 14:36, 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 **3894553** e o código CRC **E7D0E9CB**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pelo dom da vida, por me conceder boa saúde, inteligência e paciência para concluir com êxito essa etapa tão importante da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Adelina e Felicíssimo, pelo amor incondicional, por terem me fornecido todo o suporte e incentivo possível para que eu chegasse até aqui. Em especial à minha mãe, que sempre me motivou a prosseguir nos estudos.

À minha companheira, Gabriela, pelos conselhos e ajuda nos momentos difíceis, sempre ao meu lado me estimulando a vencer as minhas dificuldades e superar os meus limites, buscando a todo momento evoluir para conquistar um futuro melhor.

Aos meus irmãos e sobrinhos, por terem me alegrado e distraído com suas brincadeiras que me ajudaram a ter paciência e perseverança nos momentos que mais precisei.

Agradeço aos meus amigos, por sempre estarem presentes, pelas horas de estudo e por terem me proporcionado momentos de descontração que me ajudaram nesta trajetória.

Sou grato ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Luiz de Paula Santil, por todo o aprendizado e apoio desde a minha graduação. O trabalho foi realizado durante um período difícil de pandemia, mas o professor Santil foi sempre compreensivo e me orientou de toda forma possível nos momentos em que eu precisei de auxílio.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ) que contribuíram para a minha formação acadêmica, em especial à Prof.^a Dr.^a Adriane Andrade Silva que me aconselhou a escolher o Parque Estadual do Pau Furado como área de estudo desta pesquisa.

Agradeço à Prof.^a Dr.^a Tatiane Assis Vilela Meireles da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Prof.^a Dr.^a Ana Paula Marques Ramos da Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE) por terem aceitado participar da banca da minha Qualificação e da minha Defesa de Dissertação, bem como pelas contribuições que deram ao presente estudo. Agradeço também ao Prof. Dr. Jorge Luis Silva Brito e à Prof.^a Dr.^a Valéria Lima por aceitarem em participar como membros suplentes das mesmas bancas.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Pró-reitora de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPP-UFU), ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) e ao PPGMQ pelo incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento sustentável.

Por fim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho diretamente ou indiretamente, seja por meio de apoio, sugestões ou críticas. Muito obrigado!

“Nossa paixão por aprender é nossa
ferramenta de sobrevivência”.

(SAGAN, 1980, p. 181)

RESUMO

O Parque Estadual do Pau Furado é uma Unidade de Conservação criada com a finalidade de assegurar a preservação das espécies animais e vegetais presentes na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. O parque, representado em maior parte pelo bioma Cerrado, sofre com ocorrências de incêndio principalmente durante o período de estiagem. Visando à identificação das áreas mais susceptíveis aos incêndios florestais, este trabalho utilizou de análise multicritério aplicada às informações geoespaciais para a elaboração de um mapa de risco integrado de incêndios do parque. Com o intuito de desenvolver este mapa, deve-se levar em consideração as variáveis de influência ao fogo, as variáveis investigadas nesta pesquisa foram: uso e ocupação da terra, distância de estradas e área urbana, declividade, orientação das vertentes, hipsometria, e a precipitação em um período de cinco anos na área estudada. Para compreensão de como cada uma dessas variáveis podem interferir nos incêndios, deve ser elaborado o mapa temático e, posteriormente, o mapa de suscetibilidade, para cada variável. A partir da integração destes mapas de suscetibilidade é gerado o mapa de risco integrado de incêndio florestal, utilizando de média ponderada entre as variáveis. Em razão disso, a aplicação do processo analítico hierárquico é fundamental para a distribuição dos pesos para cada variável. A partir dos mapas gerados, foi possível constatar que 6,18% da área do parque apresenta risco muito alto para a ocorrência de incêndios, além disso, a região sul do parque demonstrou maior vulnerabilidade ao fogo, o que é confirmado pelo mapa de focos de calor. Podemos afirmar que a metodologia empregada nesta pesquisa pode ser útil aos gestores deste, e de outros parques, como material para auxiliar na tomada de decisão para medidas preventivas de incêndios florestais.

Palavras-chave: mapa de risco de incêndio florestal; geotecnologias; processo analítico hierárquico.

ABSTRACT

The Parque Estadual do Pau Furado is a Conservation Unit created with the purpose of ensuring the preservation of animal and plant species present in the mesoregion of Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba. The park, mostly represented by the Cerrado biome, suffers from fire occurrences mainly during the dry season. Aiming at identifying the most susceptible areas to forest fires, this work used multicriteria analysis applied to geospatial information for the elaboration of an integrated fire risk map in the park. In order to develop this map, the fire influence variable must be taken into account, the variables investigated in this research were: land use and occupation, distance from roads and urban area, slope, slope orientation, hypsometry, and precipitation over a period of five years in the studied area. In order to understand how each of these variables can interfere with fires, the thematic map must be prepared and, later, the susceptibility map, for each variable. From the integration of these susceptibility maps, the integrated forest fire risk map is generated, using the weighted average between the variables. Therefore, the application of the analytic hierarchy process is essential for the distribution of weights for each variable. From the generated maps, it was possible to verify that 6.18% of the park area presents a very high risk for the occurrence of fires, in addition, the southern region of the park showed greater vulnerability to fire, which is confirmed by the map of fire focus. We can say that the methodology used in this research can be useful to managers of this, and other parks, as material to assist in decision-making for preventive measures against forest fires.

Keywords: forest fire risk map; geotechnology; analytic hierarchy process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

QUADRO 1 – Escala Absoluta, Definição e Justificativa para o Processo Decisório com o Processo Analítico Hierárquico.....	14
QUADRO 2 – Escala Relativa de Saaty Utilizada para Comparação Pareada de Critérios....	15
FIGURA 1 – Mapa de Localização da Área de Estudo.....	18
FIGURA 2 – Fluxograma da Pesquisa para a Elaboração do Mapa de Risco Estrutural.....	24
FIGURA 3 – Fluxograma da Pesquisa para a Elaboração do Mapa de Risco Integrado.....	29
FIGURA 4 – Mapa de Declividade da Área de Estudo.....	31
FIGURA 5 – Mapa das Estradas e Áreas Ocupadas na Área de Estudo.....	32
FIGURA 6 – Mapa Hipsométrico da Área de Estudo.....	34
FIGURA 7 – Mapa de Orientação das Vertentes da Área de Estudo.....	36
FIGURA 8 – Mapa de Uso e Ocupação da Terra da Área de Estudo (2020).....	37
FIGURA 9 – Mapas de Suscetibilidade ao Fogo para os Fatores Estruturais da Área de Estudo.....	39
FIGURA 10 – Mapa de Risco Estrutural de Incêndio Florestal da Área de Estudo.....	40
FIGURA 11 – Mapas da Média Mensal de Precipitação Para os Meses de Estiagem na Área de Estudo.....	41
GRÁFICO 1 – Valores de Precipitação (mm) por ano e mês na Área de Estudo de 2017 a 2021.....	42
GRÁFICO 2 – Valores de Precipitação Média Mensal (mm) na Área de Estudo de 2017 a 2021.....	43
FIGURA 12 – Mapas de Risco Integrado de Incêndio Florestal da Área de Estudo.....	44
FIGURA 13 – Mapa da Densidade dos Focos de Calor na Área de Estudo de 2017 a 2021...	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Peso para as Variáveis Estruturais Aplicadas na Pesquisa, Suas Classes, Risco de Fogo e Referências.....	23
TABELA 2 – Peso para Todas as Variáveis Aplicadas na Pesquisa, Suas Classes, Risco de Fogo e Referências.....	28
TABELA 3 – Área das Classes, e Nível de Suscetibilidade ao Fogo para Declividade na Área de Estudo.....	31
TABELA 4 – Área das Classes, e Nível de Suscetibilidade ao Fogo para as Distâncias das Estradas e Áreas Ocupadas na Área de Estudo.....	33
TABELA 5 – Área das Classes, e Nível de Suscetibilidade ao Fogo para Hipsometria na Área de Estudo.....	35
TABELA 6 – Área das Classes, e Nível de Suscetibilidade ao Fogo para Orientação das Vertentes na Área de Estudo.....	35
TABELA 7 – Área das Classes, e Nível de Suscetibilidade ao Fogo para Uso e Ocupação da Terra na Área de Estudo.....	38
TABELA 8 – Área das Classes de Risco Estrutural de Incêndio Florestal Área de Estudo...	40
TABELA 9 – Valores de Precipitação (mm) por Ano e Mês na Área de Estudo de 2017 a 2021.....	42
TABELA 10 – Área Classes de Risco Integrado de Incêndio Florestal Área de Estudo.....	45
TABELA 11 – Focos de Calor Detectados na Área de Estudo, de 2017 a 2021.....	46

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Processo Analítico Hierárquico
CI	Índice de consistência
CO ₂	Gás Carbônico
CR	Taxa de Consistência
DEAU	Distância de Estradas e Área Urbana
DEC	Declividade
HIPSO	Hipsometria
IDW	Interpolação de Distância Ponderada
IEF	Instituto Estadual de Florestas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MAM	Método de Análise Multicritério
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
O ₂	Oxigênio
OE	Orientação das Encostas
PEPF	Parque Estadual do Pau Furado
PREC	Precipitação
RD	Risco Dinâmico de Incêndio Florestal
RE	Risco Estrutural de Incêndio Florestal
RI	Índice Randômico
RS	Risco Síntese de Incêndio Florestal
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
UC	Unidade de Conservação
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USO	Uso da Terra e Cobertura Vegetal
ZA	Zona de Amortecimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	4
3 JUSTIFICATIVA	4
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
4.1 Unidades de Conservação.....	5
4.2 Conceitos básicos relacionados ao fogo e ao incêndio florestal.....	6
4.2.1 Fatores estruturais.....	7
4.2.2 Fatores dinâmicos.....	7
4.3 Influência do fogo no Cerrado e Mata Atlântica	8
4.4 Geotecnologias aplicadas no monitoramento do risco de incêndio florestal	10
4.5 Métodos de Análise Multicritério	13
5 MATERIAIS E MÉTODO	17
5.1 Área De Estudo	17
5.2 Materiais	18
5.3 Metodologia.....	19
5.3.1 Risco Estrutural de Incêndio Florestal	19
5.3.2 Risco Dinâmico de Incêndio Florestal	24
6.3.3 Risco Integrado de Incêndio Florestal.....	26
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
6.1 Risco Estrutural de Incêndio Florestal	30
6.2 Risco Integrado de Incêndio Florestal	41
6.3 Focos de Calor	45
7 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

Incêndio florestal é definido como o fogo fora de controle em qualquer vegetação, seja em plantações, pastos ou áreas de preservação (SOARES; SANTOS, 2002). Este é causador de grande destruição na vegetação nativa e responsável pela perda da vida dos animais selvagens que não conseguem escapar das chamas. Ainda assim, os sobreviventes sofrem com a escassez de alimento e desidratação, o que podem ameaçar espécies em risco de extinção.

Além dos prejuízos à fauna e à flora, a poluição decorrente da fumaça ocasionada pelo fogo também causa impactos negativos ao clima, pois há emissão de gás carbônico (CO₂) na atmosfera, que é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa (GUIMARÃES et al., 2014). Essa fumaça traz riscos à população, e pode acarretar problemas de saúde como: doenças respiratórias, dores de cabeça, conjuntivite, alergias e entre outros.

De modo geral, o fogo é gerado a partir do processo físico-químico de combustão, o qual é formado pela rápida combinação entre material combustível para queimar, oxigênio (O₂) para manter as chamas, e calor para iniciar e continuar o processo de combustão. Esses são os três elementos básicos da combustão, a inter-relação entre eles é chamada de triângulo do fogo. Caso haja a ausência ou redução de um destes três elementos, dificulta-se o processo da combustão (SOARES; BATISTA, 2007).

Diversos são os fatores que influenciam no início e propagação do fogo, desde as condições climáticas até as características do relevo. As condições climáticas podem propiciar ou dificultar a ocorrência de incêndios florestais, por exemplo, regiões que apresentam características de clima tropical semiúmido, como o bioma cerrado, normalmente sofrem com incêndios durante o período de estiagem (HOFFMANN et al., 2009). Durante esse período há uma baixa precipitação, o que acaba resultando em um acúmulo de cobertura vegetal seca, desde as gramíneas até os galhos de árvores. O acúmulo dessa matéria orgânica seca no solo é como um combustível, que ao sinal de qualquer fonte de calor pode se transformar em um grande incêndio florestal.

Para a elaboração de um planejamento de prevenção e combate aos incêndios florestais, é essencial que sejam feitos análises e monitoramento nos fatores responsáveis pela origem,

intensidade e propagação do fogo. Segundo Prudente (2016), estes fatores podem ser classificados em estruturais, quando não sofrem alteração em um curto período de tempo, ou dinâmicos, relacionados às condições climáticas e responsáveis pelas alterações da inflamabilidade da cobertura vegetal. Neste trabalho, assim como para Eugenio et al. (2016), os fatores estruturais analisados foram: uso da terra e cobertura vegetal, distância de estradas e área urbana, hipsometria, declividade e orientação das encostas. Já com relação aos fatores dinâmicos, foi levado em consideração a precipitação, pois esta variável está diretamente relacionada à inflamabilidade do material combustível (NUTHAMMACHOT; STRATOULIAS, 2021).

Existem metodologias que abordam diferentes ferramentas e estratégias voltadas à prevenção e combate ao fogo. Dentre essas ferramentas, Sivrikaya et al. (2014) evidencia que os mapas de risco de incêndio florestal se destacam por apresentar de forma clara as zonas de uma região que manifestam maior suscetibilidade de ocorrência de incêndio, a partir de um diagnóstico do comportamento dos fatores preponderantes ao fogo.

Uma vez identificados os critérios relevantes à propagação do fogo na elaboração de um mapa de risco de incêndio florestal, deve ser aplicada uma metodologia que dê suporte à tomada de decisão levando em consideração a relevância de cada uma desses fatores. Com este intuito, torna-se viável a aplicação de métodos de análise multicritério (MAM). Nos últimos anos, estes vêm sendo comumente integrados às informações geoespaciais para propiciar metodologia rápida e eficaz no mapeamento de risco de incêndio florestal (AKAY; ŞAHIN, 2019).

A busca por metodologias que auxiliem na prevenção e combate de incêndios florestais em áreas naturais tem se tornado cada vez mais frequente, Nuthammachot e Stratoulis (2021), Pimenta et al. (2019) e Ramalho et al. (2021) elucidaram o potencial da aplicação de geotecnologias para a análise multicritério de avaliação do risco de incêndio florestal, o que contribui na melhoria da gestão dos recursos ambientais resultando na proteção das unidades de conservação.

O cerrado, segundo maior bioma do país em extensão, é rico em biodiversidade tanto em espécie animal quanto vegetal (KLINK; MACHADO, 2005.). Muitas dessas espécies ocorrem somente neste bioma, por esse motivo a necessidade de sua preservação. É com esse

intuito que são criadas as Unidades de Conservação, as quais se referem às áreas naturais delimitadas pelo governo que demandam proteção por apresentarem características ecológicamente especiais. No entanto, incêndios florestais que acontecem com frequência no cerrado colocam em risco a sua rica biodiversidade. Segundo dados do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), somados desde 2015 até 2020, foram queimados 873.229 km² da área do cerrado, o que corresponde a 43% do bioma.

O Parque Estadual do Pau Furado (PEPF) é uma importante unidade de conservação, que tem como missão a proteção da biodiversidade presente na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. No entorno do parque se encontra sua Zona de Amortecimento (ZA), a qual foi estabelecida com o intuito de reduzir os impactos negativos sobre a região, cuja abrangência em sua maior parte trata-se de fragmento conservado do bioma Cerrado, e em uma menor proporção uma parcela do bioma Mata Atlântica, contendo em seus limites mais de 900 diferentes espécies de fauna e flora, das quais algumas com grau de ameaça ou vulnerabilidade de extinção (Instituto Estadual de Florestas - IEF, 2011). Portanto, visando a preservação das espécies animais e vegetais presentes na região do PEPF, é de suma importância que sejam feitos estudos com a intenção de criar materiais que possam ser aplicados na prevenção e combate aos incêndios florestais, como a elaboração de mapas de risco de incêndio florestal da área.

O parque não conta com nenhum estudo, que apresente o mapeamento das áreas susceptíveis ao risco de incêndio florestal. O que justifica a importância deste estudo, tornando a pesquisa de maior relevância sob ponto de vista de produção de novo aporte bibliográfico, que venha a dar suporte à tomada de decisão para prevenção e combate de incêndios florestais no PEPF, além de servir de referência para pesquisas futuras.

2 OBJETIVOS

Elaborar mapas de risco de incêndio florestal tendo como área de estudo o Parque Estadual do Pau Furado e sua Zona de Amortecimento, a partir do uso de análise multicritério.

Dentre os objetivos específicos, tem-se:

- a) Caracterizar a área do PEPF quanto aos fatores preponderantes para a ignição e propagação do fogo;
- b) Verificar o risco estrutural de incêndio florestal no PEPF, que tem relação com os fatores que não variam ao longo do tempo (uso da terra e cobertura vegetal, distância de estradas e área urbana, hipsometria, declividade e orientação das encostas);
- c) Identificar o risco dinâmico de incêndio florestal no PEPF, que corresponde as condições climáticas (precipitação), fator que influencia nas alterações da inflamabilidade do material combustível;
- d) Determinar os pesos de cada um dos fatores preponderantes;
- e) Caracterizar as regiões propensas quanto ao grau de suscetibilidade à incêndios florestais no Parque Estadual Pau Furado.

3 JUSTIFICATIVA

A presença do fogo no Cerrado se dá a milhões de anos, porém, lamentavelmente, nos últimos anos as ocorrências de incêndios florestais vêm se tornando cada vez mais recorrentes neste bioma. De acordo com Arruda et al. (2021), nos últimos vinte anos o Cerrado sofreu com uma área total queimada correspondente a 41% do seu território, tendo uma média anual de área queimada igual a 5,4% do bioma.

Torna-se evidente a necessidade de elaboração de produtos cartográficos que auxiliem na identificação de zonas mais propícias à ocorrência de incêndios florestais no parque. Deste modo, a partir da análise de fatores que influenciam na ignição e propagação de incêndios florestais, como características climáticas e o uso da terra, junto da aplicação de métodos de análise multicritério, é possível elaborar um mapa síntese de risco de incêndio florestal para a região do PEPF e sua zona de amortecimento.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Unidades de Conservação

As Unidades de Conservação (UCs) são áreas delimitadas do território nacional com características naturais, e recursos ambientais, relevantes para a conservação e proteção de ecossistemas significativos. Esses espaços territoriais são instituídos pelo Governo Federal, bem como pelas unidades da federação, por meio dos respectivos governos estaduais e municipais, sob regime especial de administração, aos quais se aplicam garantias adequadas de uso sustentável dos recursos naturais de forma ecológica e racional (Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC).

O SNUC divide as UCs em duas categorias, com características específicas: as de Proteção Integral e as de Uso sustentável. As Unidades de Proteção Integral têm o objetivo básico de preservar a natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos recursos naturais, como visitação e pesquisa científica. Já as Unidades de Uso Sustentável, afiliam a conservação da natureza com o uso sustentável dos recursos naturais, desde que esse uso não comprometa a capacidade de regeneração dos ecossistemas.

De acordo com o Art. 25 da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, as UCs devem possuir uma Zona de Amortecimento (ZA). Ela corresponde a uma área no entorno da unidade de conservação, onde as atividades humanas estão sujeitas a normas e restrições específicas, com o propósito de minimizar os impactos negativos sobre a unidade (BRASIL, 2000).

Para Silva e Zaidan (2004), a forma mais eficiente de preservar a biodiversidade é a partir da concepção e gerenciamento de Unidades de Conservação. Estas, quase sempre reúnem os últimos refúgios para alguns dos ecossistemas do planeta. O planejamento, gestão, manejo e administração destas Unidades de Conservação é fundamental para a proteção da biodiversidade. Dentre as preocupações no manejo destas unidades, o controle de incêndios é crucial para a preservação da biodiversidade, uma vez que este fenômeno vem acontecendo com mais frequência em áreas protegidas.

O PEPF é uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, sendo a primeira desta categoria na região do Triângulo Mineiro, que foi criada em 27 de janeiro de 2007 com o objetivo de assegurar a proteção aos ecossistemas presentes na região. Por isso, a importância de se preservar a área do parque e os limites de sua ZA, que foram elaborados em função da susceptibilidade potencial aos impactos decorrentes de ações antrópicas, como definido no Plano de Manejo do Parque Estadual do Pau Furado (IEF, 2011).

4.2 Conceitos básicos relacionados ao fogo e ao incêndio florestal

O fogo acontece a partir da inter-relação entre calor, combustível e oxigênio, que resulta em uma reação físico-química denominada combustão (OLIVEIRA, 2019). A relação entre esses três elementos que viabiliza o processo da combustão constitui o triângulo do fogo, havendo a ausência de qualquer um dos componentes do triângulo do fogo a ignição que dá início a um incêndio florestal é impossibilitada.

Prudente (2016) conceitua incêndio florestal como uma combustão fora de controle que se propaga livremente, respondendo às variações do ambiente. Uma vez iniciada a combustão, esta pode permanecer pequena e lenta em um ponto, ou se propagar rapidamente em um fogo de grandes proporções. Esse comportamento do fogo vai depender diretamente das características dos combustíveis naturais, clima e topografia do ambiente local.

Os incêndios florestais podem ocorrer em áreas de preservação, fazendas, margens de estradas, proximidades de aglomerados urbanos e Unidades de Conservação, dentre outras localidades, e acarretam diversos prejuízos econômicos, ecológicos e sociais (FIEDLER et al., 2006). Arruda et al. (2021), observou que entre os anos de 2000 a 2019 no Cerrado, áreas de proteção como terras indígenas, território quilombola e Unidades de conservação, foram os tipos de domínio da terra que tiveram maior predominância de áreas atingidas pelo fogo. Portanto, o estudo dos fatores que influenciam na ocorrência desses incêndios é fundamental para que possamos prevenir danos ao ambiente e a sociedade, e consequentemente conservar estas áreas de proteção.

Alguns fatores presentes no ambiente podem facilitar a ocorrência de fogo e favorecer a sua propagação pelo meio. Estes podem ser chamados de fatores preponderantes ao incêndio

florestal e são classificados em dois tipos: fatores estruturais, de longo período, relacionados a natureza da cobertura vegetal e relevo; e os fatores dinâmicos, de curto período, referentes às condições atmosféricas e ao estado do material combustível (FELGUEIRAS, 2005). Tendo em vista que o comportamento de cada uma dessas variáveis é um fator determinante do nível de risco de incêndio florestal do local, a compreensão de como cada um desses fatores podem interferir no processo de combustão ou propagação do fogo é de suma importância para a prevenção de incêndios.

4.2.1 Fatores estruturais

Em se tratando dos fatores estruturais, estes definem as regiões que possuem características que podem propiciar a ocorrência de incêndios florestais em função da sua reduzida variabilidade ao longo do tempo. Neste trabalho, serão considerados o uso da terra e cobertura vegetal; os aspectos relacionados ao relevo como declividade, hipsometria e exposição das vertentes; e a proximidade à estradas e áreas urbanas como fatores intervenientes ao incêndio.

O tipo de cobertura vegetal tem influência direta no comportamento do fogo, Prudente (2016) explana que a variação na cobertura vegetal implica em mudanças de diferentes aspectos relacionados ao fogo, principalmente ao material combustível. Com relação a declividade, Pezzopane et al. (2001) afirma que altos valores de declividade são sinônimos de altos riscos de incêndios. A altitude do terreno também pode influenciar na ocorrência de incêndios, segundo Torres et al. (2018), quanto maior a altitude, menor é a quantidade de material combustível, e maior sua umidade, o que dificulta a ocorrência de incêndios florestais. Quanto às vertentes, aquelas com grande exposição solar apresentam alto risco de incêndio florestal (PEZZOPANE et al., 2001). Por fim, a proximidade de estradas também é um fator determinante na incidência de incêndios, visto que, de acordo com Prudente (2016), as maiores incidências ocorrem em regiões próximas a rodovias e estradas principais.

4.2.2 Fatores dinâmicos

Os fatores dinâmicos referem-se às condições climáticas e, por consequência, o estado de secura do material combustível – também chamado de inflamabilidade da cobertura florestal.

Nesta pesquisa, foi considerado como fator dinâmico a precipitação, pois esta variável está associada ao teor de umidade da vegetação e do solo, o que está diretamente relacionado ao potencial de ignição do fogo na cobertura vegetal presente na área de estudo (AKAY; ŞAHIN, 2019). Uma vez que a precipitação é fator crítico no que diz respeito a umidade da vegetação, esta condiciona a probabilidade de ocorrência de incêndios (FRAGAL, 2018). Baixa precipitação resulta em baixa umidade da cobertura vegetal, o que pode aumentar a probabilidade de incêndio. Além disso, segundo Oliveira (2019), a baixa precipitação também é fator preponderante no aumento do déficit hídrico, o que conseqüentemente aumenta os registros de foco de calor.

4.3 Influência do fogo no Cerrado e Mata Atlântica

O Cerrado abrange cerca de 24% do território nacional, é o segundo maior bioma brasileiro em extensão, rico em biodiversidade de espécie animal e vegetal. Muitas dessas espécies ocorrem somente nesse bioma, como é o caso de alguns tipos de vegetação que possuem estruturas adaptativas a presença do fogo devida à influência desse fenômeno por milhões de anos na região (NETO et al., 2017).

Existem, durante o ano no Cerrado, duas estações bem definidas: uma muito chuvosa e outra bem seca. A estação seca é o período em que o bioma está mais susceptível a ocorrência de incêndios florestais. O baixo volume precipitado nesse período, favorece o acúmulo de cobertura vegetal seca na superfície, o que acaba se tornando uma fonte de combustível (MIRANDA et al., 1996).

Silva (2018), destaca que este bioma é caracterizado por formações vegetais, definidas principalmente por cobertura vegetal arbórea, que vão desde formações mais abertas (classificadas em “campestre” quando há a presença de plantas herbáceas e gramíneas; e “savânicas” caracterizada pelo predomínio de árvores esparsas sobre estrato de gramíneas), até formações mais fechadas (denominadas como “florestal” onde há maior predominância de árvores com formação de dossel).

Ultimamente, o uso da terra e as práticas agrícolas veem mudando consideravelmente os regimes de fogo nas regiões do Cerrado. Os incêndios causados pelo homem estão ocorrendo

com uma frequência muito maior do que no passado, o que leva à degradação do solo, invasões biológicas e perda geral da biodiversidade. Este novo regime favorece as espécies herbáceas e incentiva a manutenção das fisionomias de cerrado aberto. Por outro lado, a situação oposta ocorre em áreas de conservação do cerrado, onde geralmente não são permitidos incêndios e não há programas de manejo do fogo baseados em queimadas prescritas para manter os ciclos biológicos naturais da savana – fitofisionomia essa, adaptada à presença do fogo. Como consequência, há o acúmulo de combustível, aumentando o risco de incêndios florestais e, quando ocorre um incêndio acidental, resultando no fogo descontrolado e intenso, ameaçando a fauna nativa e as espécies endêmicas do cerrado (PIVELLO, 2011).

A Mata Atlântica abrange vários ecossistemas florestais, com enclaves de outros ecossistemas não florestais. Em resultado da sua extensão latitudinal, a qual se estende do litoral norte ao litoral sul do país, este bioma apresenta variações no relevo e clima, o que promove diferentes formações vegetais e alta diversidade biológica (ATLÂNTICA, 1992).

Dentre os variados tipos de fitofisionomias que compreendem este bioma, a floresta estacional semidecidual e decidual apresentam uma característica em comum que pode ocasionar em um incêndio florestal. Esta característica é dada pela formação de florestas com presença de espécies arbóreas que perdem as folhas durante a estação seca, acarretando no acúmulo de material combustível na superfície e, conseqüentemente, ocasionando maior vulnerabilidade à ocorrência de incêndios florestais.

Ao contrário do Cerrado, as fitofisionomias presentes neste bioma não mostram evidências de uma história evolutiva influenciada pelo fogo, e suas espécies carecem de adaptações que aumentem sua resistência e resiliência após eventos de fogo. Na Mata Atlântica, a relação entre o fogo e os padrões de fragmentação da paisagem, causados em sua maioria pela conversão de florestas naturais em plantações agrícolas, são especialmente fortes, onde pequenas coberturas florestais aumentam a suscetibilidade ao fogo (KGANYAGO; SHIKWAMBANA, 2020).

A maior parte da Mata Atlântica está sob alto risco de ocorrência de incêndios, e as áreas de altíssimo risco parecem estar distribuídas tanto nas bordas quanto na parte sul do bioma. Os incêndios florestais podem até contribuir para o padrão de regeneração natural da

Mata Atlântica, entretanto, incêndios florestais fora de controle e em grande escala têm consequências prejudiciais neste bioma (SINGH; HUANG, 2022).

A ferramenta mais importante na prevenção de incêndios florestais é a avaliação de risco de incêndio, sendo essa, essencial no planejamento e monitoramento de áreas com maior suscetibilidade a ocorrência de incêndios florestais (CHUVIECO et al., 2010). Segundo Kuter et al. (2011), o mapa de risco de incêndio é necessário para que se possa determinar as zonas de maior risco de incêndio em uma floresta, além de auxiliar na escolha de medidas preventivas para estas zonas, se tornando uma ferramenta de vantagem estratégica operacional para a tomada de decisão, onde as ações necessárias podem ser tomadas de acordo com as prioridades espacial e temporal dentro das áreas de maior risco.

Para que se possa estabelecer níveis de risco de incêndio em uma região, deve ser feita uma análise criteriosa de cada fator que influencia na ignição e propagação do fogo neste local (SOARES; BATISTA, 2007). Esses fatores podem ser divididos em estruturais: se baseiam na combinação de fatores que não variam em um curto espaço de tempo, como a distância de estradas e áreas urbanas, uso da terra e cobertura vegetal, hipsometria, declividade e orientação das encostas; e dinâmicos, cujos parâmetros variam de modo quase contínuo, como as condições meteorológicas como a precipitação (PRUDENTE, 2016).

Sendo assim, a partir do estudo das variáveis que influenciam na ignição e propagação dos incêndios florestais, é possível elaborar diferentes mapas de risco. Neste estudo, pode-se citar o mapa de risco estrutural, o mapa de risco dinâmico e, por consequente, o mapa de risco integrado, responsável pela confluência dos dois anteriores. É importante destacar que, a análise desses fatores visando a elaboração de um mapa de risco, é possível a partir da aplicação de técnicas de geoprocessamento (FERNANDES et al., 2011).

4.4 Geotecnologias aplicadas no monitoramento do risco de incêndio florestal

Para Rosa (2005), as geotecnologias são o conjunto de tecnologias usadas na coleta, processamento, análise e oferta de informações georreferenciadas. Compostas por soluções em *hardware*, *software* e *peopleware*, as geotecnologias representam poderosas ferramentas para a tomada de decisões. Dentre as geotecnologias, destaca-se: Sistemas de Informação

Geográfica (SIG), plataformas para a aquisição e processamento de imagens nas áreas de Sensoriamento Remoto, Geodésia, Topografia e Fotogrametria, as quais são subáreas dentro do Geomática, sendo alguns desses dados usados neste trabalho.

Silva e Zaidan (2004), descrevem Geoprocessamento como um conjunto de conceitos, métodos e técnicas utilizados na obtenção, análise, manipulação e geração de banco de dados de informações ambientais georreferenciadas. Sua utilização na avaliação ambiental permite a realização de análises da distribuição territorial de eventos ambientais, e o estudo das propriedades e relações posicionais destes eventos. Resultando, a partir dos dados gerados, em modelos da realidade ambiental que podem ser destinados ao apoio à tomada de decisão.

Segundo Tonini et al. (2020), a análise de suscetibilidade ao fogo é de grande importância para o planejamento de estratégias de prevenção de incêndio. Pensando nisso, o uso de Sistema de Informações Geográficas (SIG) vem sendo aplicados para monitorar e mapear a distribuição espacial de uma área queimada e as áreas de risco de incêndios florestais. A aplicação do SIG é útil e fundamental na elaboração de mapas de risco de incêndio, além de servir como ferramenta para determinação de novas localizações para torres de monitoramento de incêndio, buscando desta forma, um planejamento eficaz do gerenciamento de incêndios e determinação das áreas com maior potencial de incêndio (SIVRIKAYA et al., 2014).

ESRI (2022), define SIG como um sistema que cria, gerencia, analisa e mapeia todos os tipos de dados. O SIG conecta dados a um mapa, integrando dados de localização com todos os tipos de informações descritivas neste local. Isso fornece uma base para mapeamento e análise que ajuda os usuários a entender padrões, relações e contexto geográfico. Dessa forma, a aplicação de um SIG traz benefícios como melhor gerenciamento e tomada de decisões.

Um sistema de informação geográfica (SIG) é um sistema de computador para capturar, armazenar, verificar e exibir dados relacionados a posições na superfície da Terra (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2022). O SIG pode mostrar muitos tipos diferentes de informações em um mapa, como dados sobre pessoas, população, renda ou nível de educação. Pode incluir dados sobre a paisagem, como a localização de rios, diferentes tipos de vegetação e de solo. Com a tecnologia SIG, as pessoas podem comparar as localizações de diferentes dados para descobrir como estes se relacionam uns com os outros. Isso permite que os usuários vejam, analisem e compreendam padrões e relações com mais facilidade.

Para Longley et al., (2013), o significado de SIG varia de acordo com o contexto onde é aplicado. Podendo ser definido como desde um simples repositório de mapas, uma ferramenta para realizar operações sobre dados geográficos, um sistema de apoio à tomada de decisão espacial, ou até mesmo como uma ferramenta para expor informações geográficas que não são perceptíveis de outra forma. Por ser um sistema computacional capaz de armazenar grande quantidades de informações de aspectos e eventos geográficos em bancos de dados, e processar estas informações em um curto intervalo de tempo, a utilização de SIG para a tomada de decisão efetiva na gestão de parques naturais vem sendo cada vez mais empregada.

O uso de SIG no estudo de eventos ambientais se torna indispensável, uma vez que a tecnologia possibilita o manuseio, interação e atualização de grande quantidade de dados, de modo rápido e eficaz, gerando informações com alto nível de precisão. Sua aplicação permite uma análise detalhada de diversas situações ambientais como deslizamentos, desmoronamentos, incêndios e desmatamento. Além disso, possibilita a individualização de cada espaço a partir de suas características, identificando os fenômenos que nele ocorrem. Essa capacidade de um SIG de analisar as inter-relações entre diversas informações temáticas, torna este uma ferramenta determinante para a gestão do território (SILVA; ZAIDAN, 2004).

O SIG pode ser usado para agregar valor aos dados espaciais. A partir do mapeamento, gerenciamento, monitoramento e modelagem destes dados espaciais, o SIG cria informações úteis para ajudar na elaboração de estratégias para manutenção e conservação ambiental. Podendo ser descrito como uma forma de sistema de apoio à tomada de decisão espacial (HEYWOOD et al., 2002).

A atualização frequente de informações de uso da terra é essencial para muitas aplicações socioeconômicas e ambientais, incluindo desde o planejamento urbano até a conservação e gestão de recursos naturais. O emprego de Sensoriamento Remoto, proporciona a possibilidade para obter informações de uso e cobertura da terra, por intermédio de interpretação e classificação de imagens que cobrem uma grande área geográfica e possuem alta frequência temporal (LI et al., 2014).

Butt et al. (2015), elucida a importância da incorporação de Sensoriamento Remoto e SIG para o estudo de detecção de mudanças no uso e cobertura da terra de uma área, pois oferece informações cruciais sobre a distribuição espacial, bem como a natureza das mudanças

de cobertura do solo. O que pode ser útil para a identificação de áreas queimadas a partir de imagens de satélites. As abordagens de Sensoriamento Remoto para detecção de alterações na superfície, têm sido amplamente utilizadas devido à sua relação custo-benefício, extensibilidade e frequência temporal (JENSEN; IM, 2007).

Visto que o emprego das Geotecnologias viabiliza a produção de mapas e obtenção de informações de diferentes aspectos da superfície terrestre, a implementação de análise multicritério se apresenta como uma ferramenta que pode auxiliar na gestão dos mapas gerados. Buscando, dessa forma, fomentar na elaboração de estratégias de prevenção de incêndios florestais em parques.

4.5 Métodos de Análise Multicritério

Sempre que um problema apresenta vários fatores que podem influenciar na sua solução, são indicados modelos de tomada de decisão por meio de múltiplos critérios. Os Métodos de Análise Multicritério (MAM) têm sido desenvolvidos para apoiar o processo decisório na avaliação e escolha das alternativas para solução de problemas, sob a influência de múltiplas variáveis. Nos problemas multicritério, o agente de decisão pode considerar que alguns fatores tenham maior ou menor relevância do que outros. Para expressar a importância relativa entre as variáveis são aplicadas medidas aos pesos dos critérios. A atribuição de valores a estes pesos deve ser feita de forma cautelosa, uma vez que influenciam de maneira decisiva na resultante do conflito entre critérios. Dentre as diversas técnicas para atribuição de pesos às variáveis, uma que se destaca é aquela empregada no método Processo Analítico Hierárquico (Analytical Hierarchy Process – AHP), baseada na análise comparativa de importância entre os pares de critérios, criando níveis hierárquicos, facilitando, assim, sua compreensão e avaliação (GOMES; GOMES, 2000).

Na análise de problemas para a tomada de decisão considerando muitas variáveis, em alguns casos é necessário a escolha de critérios aos quais devem ser atribuídos pesos e valores para cada variável durante o processo de avaliação. Ou seja, cria-se uma hierarquia para facilitar a tomada de decisão, onde se prioriza os critérios com maior peso e significância (FRANCO et al., 2013). Para dar suporte à tomada de decisão, com possibilidade de análise comparativa de fatores ou atributos, e de múltiplos cenários, deve ser utilizado MAM.

Longley et al. (2013), aponta o AHP como um exemplo de suporte para a tomada de decisão multicritério, o qual procura entender a perspectiva de cada parte interessada sobre os pesos apropriados a atribuir a cada critério. Onde, primeiramente, o impacto de cada critério é expresso como uma função, posteriormente, é feita a comparação de pares de critérios (com n critérios, há $n(n-1)/2$ pares) e a avaliação de importância relativa na forma de uma razão. E, por fim, é criada uma matriz representando o conjunto de pesos para cada critério analisado.

Segundo Miranda (2005), um dos métodos mais usados para medir as preferências entre os critérios é o da “comparação parelha”, também conhecida como “processo analítico hierárquico” AHP, elaborado por Thomas Saaty. O princípio é questionar se um critério é mais importante do que outro. Os pesos para os critérios são gerados por atribuições qualitativas sobre a diferença para cada comparação de pares de critério. Os diferentes níveis de importância entre os critérios são expressados em uma escala de nove pontos (Quadro 1 e 2).

O método AHP, é extensivamente estudado e atualmente é usado na tomada de decisões em cenários complexos com múltiplos critérios. É uma teoria geral de mensuração, usado para derivar escalas, absoluta (Quadro 1) ou relativa (Quadro 2), de comparações entre pares discretos e contínuos. Quando aplicado em problemas geoespaciais, os atributos são administrados e tratados em ambiente SIG, onde dados vetoriais ou matriciais convergem para a produção de um mapa final, que irá evidenciar as potencialidades ou fragilidades para o tema de estudo (PIMENTA et al, 2019).

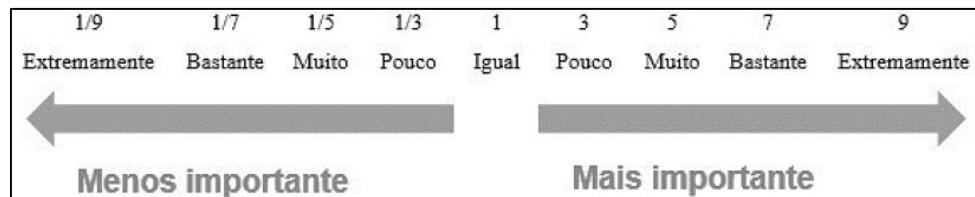
Quadro 1 – Escala absoluta, definição e justificativa para o processo decisório com AHP.

Intensidade da importância da escala absoluta	Definição	Justificativa
1	Igual importância	As duas atividades contribuem equitativamente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro fator	Julgamento e experiência favorecendo fortemente uma atividade sobre a outra
5	Essencial ou forte importância	Julgamento e experiência favorecendo fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância Extrema	Evidência favorecendo uma atividade sobre a outra é a mais expressiva possível na ordem de afirmação
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os julgamentos adjacentes	Quando há necessidade de compromisso

Fonte: Pimenta et al. (2019).

A escala de relativa importância, a qual determina a importância relativa entre dois critérios, foi elaborada a partir da escala absoluta, a qual atribui valores de 1 a 9. Inicialmente o avaliador deve julgar se o critério “A” é mais importante que o “B” (menos importante e mais importante) e, sendo este o caso, quanto “A” é melhor que “B”, onde se inserem os pesos utilizando-se a escala para quantificar essa percepção, como apresentado a seguir.

Quadro 2 – Escala relativa de Saaty, utilizada para comparação pareada de critérios.



Fonte: Pimenta et al. (2019).

A sobreposição de mapas é a técnica tradicional de integração de dados para uso na tomada de decisões espaciais. Os Métodos de Análise Multicritério (MAM) permitem que as camadas do mapa sejam ponderadas para refletir sua importância relativa, combinando os critérios analisados de acordo com sua importância na tomada de uma determinada decisão. O MAM fornece ao SIG os meios de avaliar problemas complexos de decisão de múltiplos critérios, tendo juntos, o potencial de fornecer ao tomador de decisão uma abordagem racional, objetiva e imparcial para a tomada e suporte de decisões espaciais (HEYWOOD et al., 2002).

O planejamento para elaboração de um mapa de risco de incêndio florestal envolve análise espacial utilizando um considerável agrupamento de variáveis múltiplas em ambiente SIG, caracterizando uma análise multicritérios. Portanto, o MAM integrado ao SIG fornece procedimentos de solução mais adequados para esse problema. A integração entre estas duas técnicas para gerar um método eficiente para mapeamento de risco de incêndio florestal, vem sendo muito utilizada nos últimos anos. Dentre os métodos de análise multicritério, o AHP é um dos métodos mais comuns aplicados no estudo de incêndios florestais (JAISWAL et al., 2002).

Sousa et al. (2017) aponta que a aplicação de AHP consiste nas seguintes etapas: definição do problema a ser resolvido, estruturação da hierarquia, análise de prioridade e verificação de consistência. Aplicando estas etapas às variáveis estudadas, levando em consideração qual o resultado a pesquisa busca gerar, os pesos serão atribuídos aos diferentes

critérios e alternativas que caracterizam uma decisão, possibilitando escolher a melhor alternativa ao problema.

Portanto, a partir do modelo de Saaty (2008), a utilização do método AHP aplicado a um estudo geoespacial é composta por três etapas: definição dos critérios (mapas temáticos) que compõem a matriz de decisão hierárquica; construção do conjunto de matrizes de comparação pareada com os atributos selecionados na etapa anterior; e atribuição de pesos aos critérios previamente definidos.

Finalmente, a partir da prática do processo analítico hierárquico, sobreposto aos mapas dos fatores facilitadores ao fogo, gerados com base nos princípios das geotecnologias, se fez viável a execução deste trabalho, visando o desenvolvimento de produtos que possam vir a ser útil na tomada de decisão e elaboração de medidas preventivas de incêndios florestais em parques.

5 MATERIAIS E MÉTODO

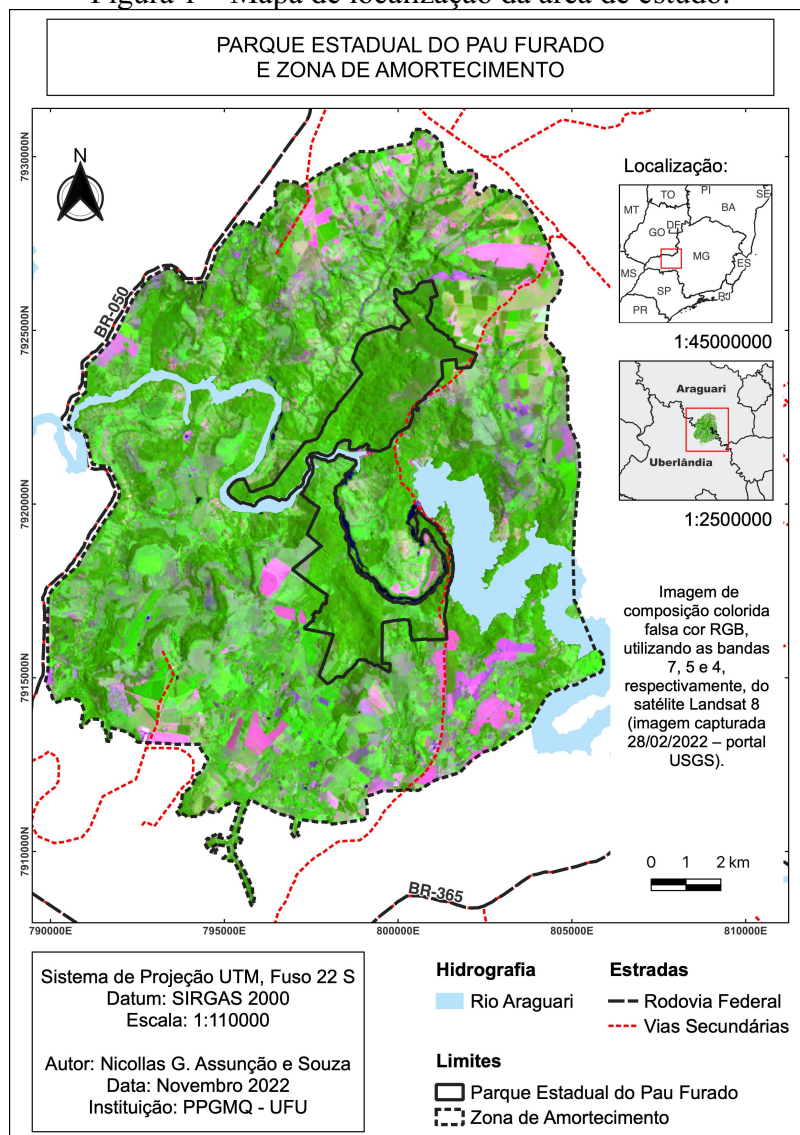
5.1 Área De Estudo

A presente pesquisa foi desenvolvida no Parque Estadual do Pau Furado (PEPF) e sua Zona de Amortecimento (ZA), situados na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, abrangendo os municípios de Uberlândia e Araguari (Figura 1), localizado nas coordenadas geográficas 18°49'43"S e 48°10'03"W. O PEPF é uma Unidade de Conservação (UC) de Proteção Integral, a primeira desta categoria no Triângulo Mineiro, criada com o objetivo de preservar os recursos ambientais, como a fauna e a flora da região (IEF, 2011).

De acordo com o Plano de Manejo do PEPF elaborado pelo IEF (2011), a classificação climática de Köppen na região do parque é do tipo Aw – clima tropical de savana, apresentando duas estações bem definidas, um verão chuvoso (entre os meses de outubro a março) e um inverno seco (a partir de abril até setembro). Marcada por uma tendência de redução da umidade relativa do ar no período de maio a agosto (período de seca), havendo o aumento no período chuvoso, entre setembro a março, a região tem típica característica climática do bioma Cerrado (ALVARES et al., 2013).

Em toda extensão do Parque Estadual do Pau Furado, o qual abrange uma área de 2.186,85 ha, tem-se a ocorrência de vegetação característica tanto do bioma Mata-Atlântica, com Floresta Estacional Decidual e Semidecidual, quanto do bioma Cerrado, que apresenta em menor proporção Mata Ciliar, Cerrado sentido restrito, Cerradão e Pastagem. A área de abrangência do parque tem declividade média a forte em direção aos cursos d'água e solos rasos, e encontra-se sobre a geologia regional da bacia do Rio Araguari (IEF, 2011).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: O autor.

Por apresentar uma característica de baixa umidade e precipitação durante alguns meses do ano, a vegetação presente na área do PEPF tende a manifestar uma fitofisionomia seca ou morta nesse período, e o acúmulo desse material pouco úmido no solo pode colaborar no processo de ignição que dá início ao incêndio florestal. Diante dessas características da região, é apontada a importância de estudar o comportamento dos fatores estruturais e dinâmicos com a finalidade de prevenir a ocorrência de incêndios no parque.

5.2 Materiais

Para a realização da presente pesquisa e conquista dos objetivos propostos, foram empregados a utilização dos *softwares*: Excel versão 15.26 (aplicado para gerenciar os dados

de precipitação e focos de calor, e gerar os valores de peso para as variáveis estudadas); *Google Earth Pro* versão 7.3 (usado para uma observação histórica das imagens de satélite do PEPF); e *QGIS* versão 3.22 (utilizado na elaboração de todos os mapas apresentados nesta pesquisa).

Além dos *softwares* apresentados, durante a execução desta pesquisa também foram utilizadas algumas plataformas online para obtenção de dados: *Agritempo* (plataforma usada na aquisição dos dados de precipitação); *BDQueimadas* (responsável pela geração dos dados de focos de calor); *IDE-Sisema* (usada para adquirir os vetores aplicados nos mapas); *Mapbiomas* (utilizada na elaboração do mapa de uso e ocupação da terra); e *USGS EarthExplorer* (empregada na obtenção de imagens de satélite Landsat 8).

5.3 Metodologia

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos na presente pesquisa, foi empregada uma metodologia baseada em Akay e Şahin (2019), Eugenio et al. (2016), Nuthammachot e Stratoulis (2021), Ramalho et al. (2021), os quais empregam a utilização do processo analítico hierárquico para atribuir peso para cada um dos fatores a serem analisados no estudo do risco de incêndios florestais, com o propósito de gerar um mapa síntese que traduza as áreas vulneráveis à ocorrência do fogo e permitam aos gestores do parque ações preventivas de combate aos incêndios.

O trabalho fragmentou-se em três principais etapas: construção do mapa de risco estrutural (a partir dos fatores que não variam em um curto período de tempo); produção do mapa de risco dinâmico (com base na precipitação dos anos de 2017 até 2021); e, por fim, a união dos mapas de risco estrutural e dinâmico, que resulta no mapa de risco integrado de incêndio florestal.

5.3.1 Risco Estrutural de Incêndio Florestal

Para a elaboração desse mapa de risco são considerados os fatores facilitadores de ignição e propagação do fogo que não variam ao longo do tempo, sendo eles: o uso da terra e cobertura vegetal, a distância de estradas e área urbana, a hipsometria, a declividade e por último a orientação das encostas. Após a elaboração dos mapas temáticos de cada um dos

fatores estruturais, sucedeu-se a reclassificação de acordo com a susceptibilidade ao fogo, onde cada elemento receberá um coeficiente entre 1 a 5 (sendo 1 muito baixa, 2 baixa, 3 moderada, 4 alta e 5 muito alta susceptibilidade).

Com relação ao uso e ocupação da terra, o mapa gerado foi obtido a partir do banco de dados da plataforma Mapbiomas (2020), o qual, para a área de estudo, apresentou as seguintes classes: Fitofisionomia Cerrado (abrange as classes Formação Campestre, Savânicas e Pastagem), Silvicultura, Formação Florestal, Agricultura (engloba as classes Café, Campo Alagado e Área Pantanosa, Cana, Mosaico de Agricultura e Pastagem, Outras Áreas não Vegetadas, Outras Lavouras Temporárias, e Soja), e por fim a classe de Rio, Lago e Oceano. Após a elaboração deste mapa, foi feita sua reclassificação na qual cada classe recebeu um coeficiente de acordo com a sua susceptibilidade ao fogo. Essa reclassificação seguiu baseada nos estudos de Eugenio et al. (2016) e Silva (2018), pois estes apresentaram classes semelhantes para a variável de uso e ocupação da terra em seus respectivos estudos.

O PEPF se encontra na divisa entre dois municípios, Araguari ao Norte do parque, e Uberlândia ao sul. Sua zona de amortecimento faz fronteira com a BR-050, uma rodovia com grande fluxo de veículos de passeio e de carga, e ainda existem algumas vias municipais e estaduais que não tem um fluxo de veículos tão grande quanto a BR-050, mas se encontram dentro da zona de amortecimento. Além disso, também dentro da zona de amortecimento do parque, existem algumas chácaras e assentamentos. Uma vez que o homem é o principal agente na ocorrência de incêndios, a proximidade do parque com estas vias e áreas urbanizadas potencializam a chances de iniciar um incêndio florestal.

Na elaboração do mapa de distância de estradas e área urbana, foram aplicados *buffers* (áreas de influência) em torno das vias que passam próximas ou dentro da área de estudo, e o mesmo procedimento foi efetuado para as chácaras e assentamentos. Nestas áreas de influência, foram gerados *buffers* de 150, 300, 450 e 600 metros. O coeficiente de susceptibilidade ao fogo foi determinado com base na distância, visto que quanto menor a distância, maior é a probabilidade de acontecer um incêndio. A atribuição de suscetibilidade ao fogo para esta variável se deu baseado no trabalho de Saidi et al. (2021).

No desenvolvimento dos mapas de hipsometria, declividade e orientação das encostas, foram utilizadas imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial

de 30 metros, obtidas pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) no ano 2000 com o intuito de mapear o relevo terrestre. Posterior a aquisição das imagens referentes à área de estudo, que se encontram disponíveis para download na página do Centro de Dados do Departamento de Levantamento Geológico dos Estados Unidos (USGS), foram empregadas ferramentas de um software de geoprocessamento para geração de cada um dos mapas temáticos.

Concluídos os mapas temáticos pertinentes à hipsometria, declividade e orientação das encostas, foi feita a reclassificação concernente ao coeficiente de susceptibilidade ao fogo para cada um dos fatores. A hipsometria foi classificada de acordo com a altitude da região estudada, sendo que quanto maior a altitude menor é o risco de incêndio, já que em maiores elevações a umidade relativa do ar é maior. Para a reclassificação da classe de hipsometria, no que diz respeito ao risco de incêndios florestais, foi consultado o material elaborado por Oliveira (2019). Com relação à declividade, quanto mais acentuada for, maior é a susceptibilidade, isso porque no sentido do aclave a transferência de calor é facilitada. Esta variável foi reclassificada seguindo Benguerai et al. (2019); Nuthammachot e Stratoulis (2021). Por fim, no que concerne à orientação das encostas, as faces que apresentam maior probabilidade de ocorrência e propagação de incêndios são aquelas voltadas para o norte, isso em razão de que no hemisfério sul os raios solares incidem diretamente nessa face, como mencionado por Ramalho et al. (2021).

Após a geração do mapa temático para cada um dos fatores estruturais, e a reclassificação desses fatores em relação ao coeficiente de susceptibilidade ao fogo, foi elaborado o mapa de risco estrutural de incêndios florestal, para isso, foi utilizado o processo analítico hierárquico. O peso para cada fator foi estimado com base no AHP desenvolvido por Saaty, (1977), o qual faz uso de comparações entre pares e cria prioridades entre os elementos na hierarquia. O processo de ponderação de critérios de pares foi baseado na importância relativa de cada elemento, que foi observado na revisão de literatura e é apresentada na tabela 1, que demonstra também as variáveis estruturais, junto do seu peso, classes e risco ao fogo.

Os pesos para cada elemento foram calculados dividindo-se a soma de cada linha com o número total de elementos. O índice de consistência (CI) e a taxa de consistência (CR) foram calculados com base nas Equações 1 e 2:

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

Onde, vetor de consistência = (somatório dos pesos) / (pesos dos critérios),
 λ_{\max} = somatório (vetor de consistência) / n.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Onde, RI = índice randômico (valor fixo baseado no número de critérios avaliados) e $CR \leq 0,10$ é considerado aceitável. Neste estudo, $CI = 0,088$ e $RI = 1,12$. Portanto, CR é $0,078$, que é inferior a $0,10$, e, sendo assim, os pesos calculados para as variáveis estruturais no estudo do risco estrutural de incêndios florestais no PEPF, são considerados estatisticamente aceitáveis.

Na equação 3 é apresentado o peso para cada variável estrutural, após a aplicação do processo analítico hierárquico:

$$RE = (USO*0,45) + (DEAU*0,28) + (DEC*0,15) + (OE*0,08) + (HIPSO*0,04) \quad (3)$$

Sendo:

RE = risco estrutural;

USO = uso da terra e cobertura vegetal;

DEAU = distância de estradas e área urbana;

DEC = declividade;

OE = orientação das encostas;

HIPSO = hipsometria.

Em virtude de o material combustível ser um dos elementos fundamentais para a ocorrência do fogo, o uso e ocupação da terra foi o fator que recebeu maior peso (0,45). Como a presença do homem aumenta as chances de início de incêndio, a variável distância das estradas e assentamentos recebeu o segundo maior peso (0,28). Pela influência que exerce no comportamento do fogo, a declividade recebeu o terceiro maior peso (0,15). Portanto, o mapa de risco estrutural de incêndio florestal foi elaborado a partir do modelo matemático que

apresenta os pesos, atribuídos a partir da aplicação do processo analítico hierárquico, para cada uma das variáveis estruturais. O mapa estrutural dividiu-se em cinco classes de risco de incêndio: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

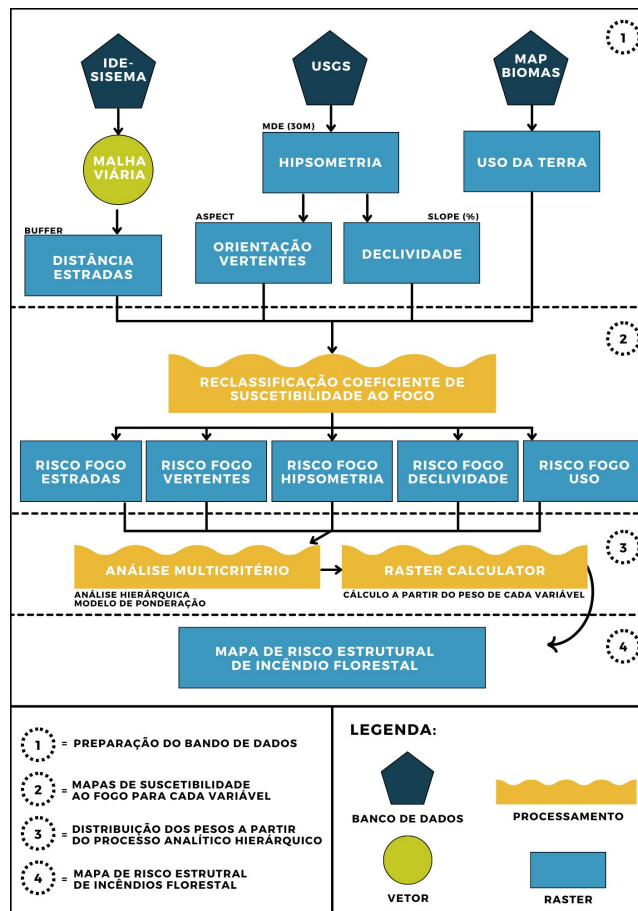
As principais etapas que deverão ser tomadas para a elaboração cartográfica do risco estrutural de incêndio florestal estão apresentadas no fluxograma a seguir (Figura 2).

Tabela 1 – Peso para as variáveis estruturais aplicadas na pesquisa, suas classes, risco de fogo e referências.

Variável	Peso	Classes	Risco de Fogo	Referências
Uso Ocupação da Terra	0,45	Fitofisionomia Cerrado;	Muito Alto	EUGENIO (2016); SILVA (2018).
		Silvicultura;	Alto	
		Formação Florestal;	Moderado	
		Agricultura;	Baixo	
		Rio, Lago e Oceano.	Muito Baixo	
Distância de Estradas e Assentamentos (m)	0,28	< 150m	Muito Alto	SAIDI (2021);
		150,01 a 300	Alto	
		300,01 a 450	Moderado	
		450,01 a 600	Baixo	
		> 600m	Muito Baixo	
Declividade (%)	0,15	> 50%	Muito Alto	BENGUERAI (2019); NUTHAMMACHOT (2021).
		30,01 a 50%	Alto	
		20,01 a 30%	Moderado	
		10,01 a 20%	Baixo	
		< 10%	Muito Baixo	
Orientação das Vertentes	0,08	Norte	Muito Alto	RAMALHO (2021).
		Nordeste e Noroeste	Alto	
		Leste e Oeste	Moderado	
		Sudeste e Sudoeste	Baixo	
		Plano e Sul	Muito Baixo	
Hipsometria (m)	0,04	< 600m	Muito Alto	OLIVEIRA (2019).
		600,01 a 700m	Alto	
		700,01 a 800m	Moderado	
		800,01 a 900m	Baixo	
		> 900m	Muito Baixo	

Fonte: O autor.

Figura 2 – Fluxograma da pesquisa para a elaboração do mapa de risco estrutural.



Fonte: O autor.

5.3.2 Risco Dinâmico de Incêndio Florestal

No intuito de elaborar esse mapa de risco foi analisado o fator preponderante de incêndio florestal relacionado às condições climáticas, a precipitação. Esta variável, responsável pela inflamabilidade do material combustível, foi analisada durante um período de cinco anos. Foram observados o valor de precipitação média mensal para os meses de abril a setembro dos anos de 2017 até 2021, sendo que o valor aplicado para o mapa de precipitação foi a média do valor de precipitação de cada mês do período de estiagem dentro do período estudado. Posteriormente a elaboração dos mapas temáticos de cada um dos meses de estiagem, foi feita a reclassificação de acordo com a susceptibilidade ao fogo, na qual cada elemento receberá um coeficiente entre 1 a 5 (sendo 1 muito baixa, 2 baixa, 3 moderada, 4 alta e 5 muito alta susceptibilidade).

As estimativas de precipitação por meio de imagens de satélite se tornaram crucial para estudar dados climáticos em regiões com baixa densidade de estações meteorológicas, permitindo um aumento na quantidade de informações meteorológicas da região por intermédio da utilização desses satélites. Nesta pesquisa, foram utilizados os dados da plataforma Agritempo (Embrapa), que através das imagens provenientes do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) da NASA, cria as chamadas estações virtuais. Uma vez que os sensores a bordo do satélite TRMM monitoram nuvens, precipitação, fluxo de calor, e outros aspectos meteorológicos, este sistema oferece valiosas imagens para a análise e previsão de precipitação (Sistema de Monitoramento Agrometeorológico – Agritempo, 2015).

A aquisição de dados para a elaboração dos mapas de precipitação ocorreu a partir do banco de dados do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (Agritempo). Segundo o sistema, a cidade de Uberlândia possui oito estações meteorológicas, enquanto a cidade de Araguari possui quatro. Para este estudo foram empregados os dados das estações meteorológicas mais próximas ao PEPF, para que possam ser gerados os mapas das médias mensais de precipitação durante o período de análise na área de estudo. Portanto, foram analisados dados de um total de 12 estações, sendo 7 em Uberlândia, 3 em Araguari, 1 em Indianópolis e 1 em Uberaba. Os mapas de precipitação foram produzidos aplicando-se a ferramenta Interpolação de Distância Ponderada (IDW), no software de geoprocessamento QGIS.

O coeficiente de susceptibilidade ao fogo é inversamente proporcional à precipitação, ou seja, quanto menor a precipitação maior é a possibilidade de ocorrência de incêndio. Isso justifica porque os meses referentes ao período de estiagem são os que apresentem maior número de ocorrência de incêndios. Para a reclassificação dessa variável em relação ao risco de fogo, foi considerado o estudo apresentado por Prudente (2016), isto porque neste estudo também foi levado em consideração os dados de precipitação dos meses de estiagem, além disso, sua área de estudo também foi no Cerrado.

Por fim, gerados os mapas temáticos para cada um dos meses de estiagem, e feita a reclassificação desses fatores em relação ao coeficiente de susceptibilidade ao fogo, foi elaborado o mapa de risco dinâmico de incêndios florestal, conforme exposto pela equação 4:

$$RD = PREC_{(4)}$$

Sendo:

RD = risco dinâmico;

PREC = precipitação.

O mapa de risco dinâmico, assim como o mapa de risco estrutural, foi dividido em cinco classes de risco de incêndio: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto.

6.3.3 Risco Integrado de Incêndio Florestal

Uma vez que elaborados os mapas de risco estrutural e dinâmico, os quais irão atribuir valores de susceptibilidade ao fogo para os fatores preponderantes, poderá ser feita a integração destes no intuito de gerar um mapa que leva em consideração diversos elementos que podem influenciar no processo de ignição e propagação do fogo, o mapa de risco integrado.

Com o propósito de reproduzir este mapa, o qual era um dos objetivos nesta pesquisa, aplicou-se uma combinação linear ponderada, sendo os pesos determinados a partir do processo analítico hierárquico, entre os mapas de risco estrutural e dinâmico. A metodologia é a mesma utilizada para determinar os pesos das variáveis estruturais, anteriormente. Sendo assim, serão aplicadas às Equações 1 e 2, novos valores, levando em consideração desta vez, a variável dinâmica precipitação.

Neste caso, o índice de consistência foi $CI = 0,067$ e o índice randômico $RI = 1,24$. Portanto, a taxa de consistência CR é $0,084$, que é inferior a $0,10$, e, sendo assim, os pesos calculados para as variáveis estruturais junto da variável dinâmica no estudo do risco integrado de incêndios florestais no PEPF, são considerados estatisticamente aceitáveis.

Na equação 5 é apresentado o peso para cada variável estudada, após a aplicação do processo analítico hierárquico:

$$RS = (PREC*0,35) + (USO*0,30) + (DEAU*0,17) + (DEC*0,10) + (OE*0,05) + (HIPSO*0,03)_{(5)}$$

Sendo:

RS = risco síntese;

PREC = precipitação;

USO = uso da terra e cobertura vegetal;

DEAU = distância de estradas e área urbana;

DEC = declividade;

OE = orientação das encostas;

HIPSO = hipsometria.

A tabela 2 demonstra as variáveis estruturais e dinâmica, junto do seu peso, classes, risco ao fogo e revisão da literatura utilizada para determinação da suscetibilidade ao fogo para cada um dos fatores estruturais observados.

Conforme definido por Nuthammachot e Stratoulis (2021), foi adotado maior peso para a variável precipitação, pois esta afeta a umidade da vegetação, o que influencia diretamente na inflamabilidade do combustível. O mapa de risco integrado, assim como os anteriores, receberá as seguintes classes de risco de incêndio: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

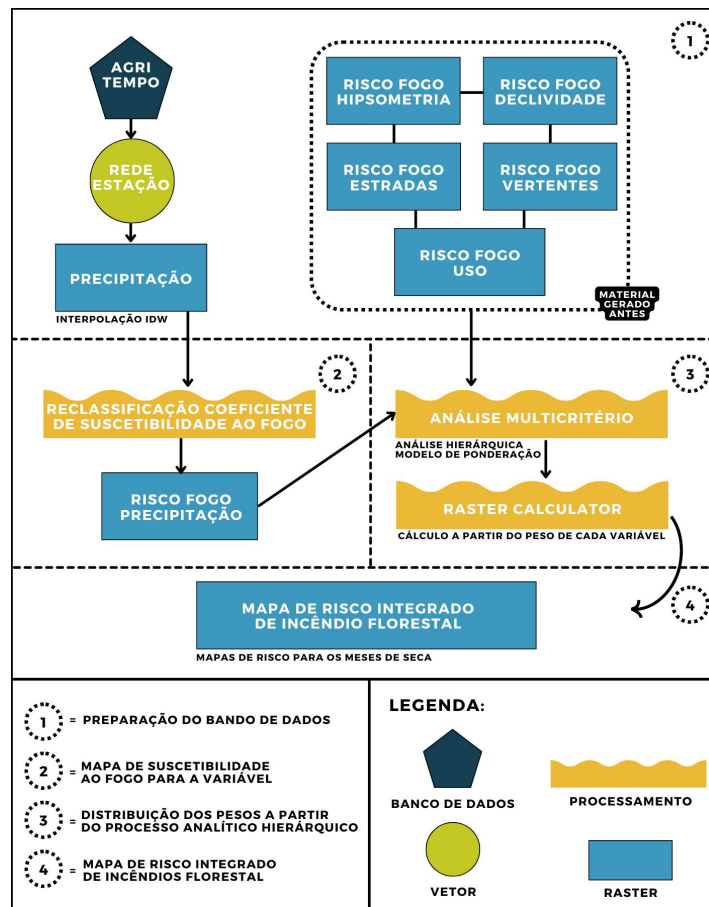
O mapa de risco integrado, assim como no mapa de risco estrutural, receberá as seguintes classes de risco de incêndio: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. A metodologia empregada para a elaboração do mapa de risco integrado pode ser observada no fluxograma a seguir (Figura 3).

Tabela 2 – Peso para todas as variáveis aplicadas na pesquisa, suas classes, risco de fogo e referências.

Variável	Peso	Classes	Risco de Fogo	Referências
Precipitação (mm)	0,35	< 15mm	Muito Alto	PRUDENTE (2016).
		15,01 a 30mm	Alto	
		30,01 a 45mm	Moderado	
		45,01 a 60mm	Baixo	
		> 60,01mm	Muito Baixo	
Uso Ocupação da Terra	0,30	Fitofisionomia Cerrado;	Muito Alto	EUGENIO (2016); SILVA (2018).
		Silvicultura;	Alto	
		Formação Florestal;	Moderado	
		Agricultura;	Baixo	
		Rio, Lago e Oceano.	Muito Baixo	
Distância de Estradas e Assentamentos (m)	0,17	< 150m	Muito Alto	SAIDI (2021);
		150,01 a 300	Alto	
		300,01 a 450	Moderado	
		450,01 a 600	Baixo	
		> 600m	Muito Baixo	
Declividade (%)	0,10	> 50%	Muito Alto	BENGUERAI (2019); NUTHAMMACHOT (2021).
		30,01 a 50%	Alto	
		20,01 a 30%	Moderado	
		10,01 a 20%	Baixo	
		< 10%	Muito Baixo	
Orientação das Vertentes	0,05	Norte	Muito Alto	RAMALHO (2021).
		Nordeste e Noroeste	Alto	
		Leste e Oeste	Moderado	
		Sudeste e Sudoeste	Baixo	
		Plano e Sul	Muito Baixo	
Hipsometria (m)	0,03	< 600m	Muito Alto	OLIVEIRA (2019).
		600,01 a 700m	Alto	
		700,01 a 800m	Moderado	
		800,01 a 900m	Baixo	
		> 900m	Muito Baixo	

Fonte: O autor.

Figura 3 – Fluxograma da pesquisa para a elaboração do mapa de risco integrado.



Fonte: O autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os mapas gerados neste trabalho foram baseados na metodologia proposta por Akay e Şahin (2019), Eugenio et al. (2016), Nuthammachot e Stratoulis (2021), Ramalho et al. (2021), os quais empregam a utilização do processo analítico hierárquico para atribuir peso para cada um dos fatores a serem analisados no estudo do risco de incêndios florestais, e a interpretação destes mapas torna possível a compreensão do comportamento dos fatores estruturais e dinâmico da área de estudo. O que, sucessivamente, torna factível a identificação das áreas do parque que tem maior ou menor suscetibilidade à ocorrência de incêndios florestais.

6.1 Risco Estrutural de Incêndio Florestal

Como dito anteriormente, o risco estrutural se dá pela combinação de variáveis que não variam em um curto intervalo de tempo, sendo estas: declividade, distância das estradas e áreas urbanas, hipsometria, orientação das vertentes, e uso da terra e cobertura vegetal. Lembrando que, os mapas de hipsometria, declividade e orientação das vertentes foram gerados com base em imagens SRTM com resolução espacial de 30 metros. No que diz respeito ao mapa de distância das estradas e áreas urbanas, este foi produzido com apoio dos vetores de estradas e assentamentos obtidos no portal IDE Sisema. Por fim, o mapa de uso da terra e cobertura vegetal foi fundamentado em dados da plataforma Mapbiomas, também com 30 metros de resolução espacial.

A declividade do terreno afeta o comportamento do fogo, uma vez que em regiões de aclive o fogo se propaga mais rapidamente (RIBEIRO et al., 2012). A figura 4 apresenta o mapa de declividade da área de estudo.

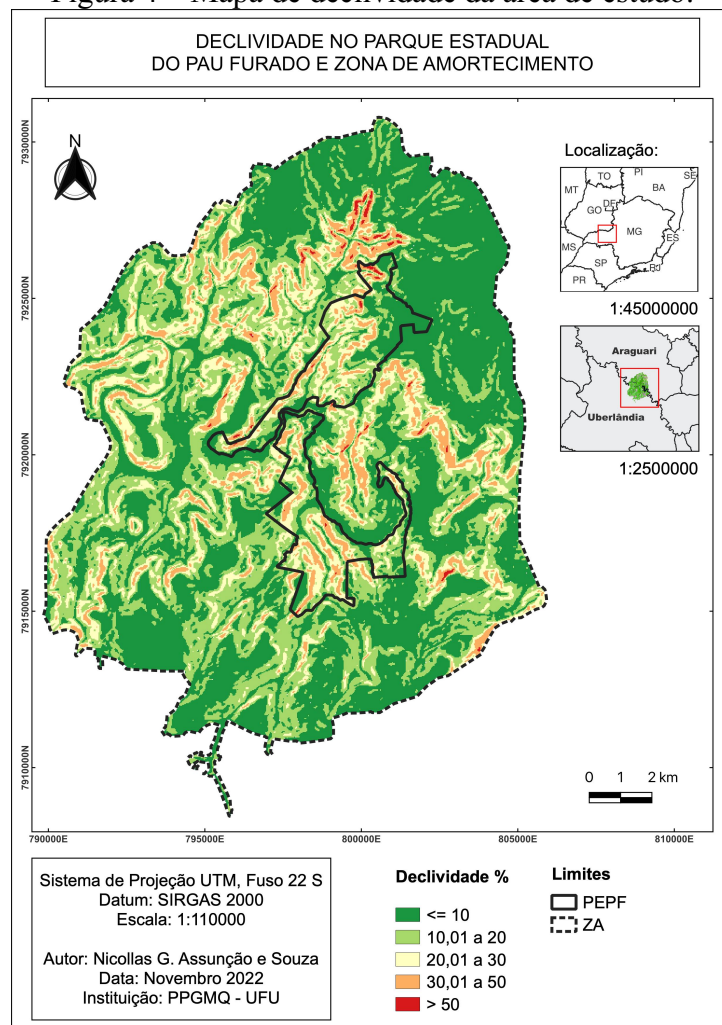
O Parque Estadual do Pau Furado apresenta em sua maior parte um percentual de declividade < 10%, no entanto, na região centro norte do parque é possível observar aclives > 50%. A tabela 3 mostra a suscetibilidade ao fogo para cada uma das classes de declividade.

Tabela 3 – Área das classes, e nível de suscetibilidade ao fogo para declividade na área de estudo.

Declividade	Km ²	%	Suscetibilidade
<= 10 (%)	104,21	46,43	Muito Baixo
10,01 a 20 (%)	72,82	32,44	Baixo
20,01 a 30 (%)	32,39	14,43	Moderado
30,01 a 50 (%)	14,37	6,4	Alto
> 50 (%)	0,655	0,292	Muito Alto
Total	224,44	100	

Fonte: O autor.

Figura 4 – Mapa de declividade da área de estudo.



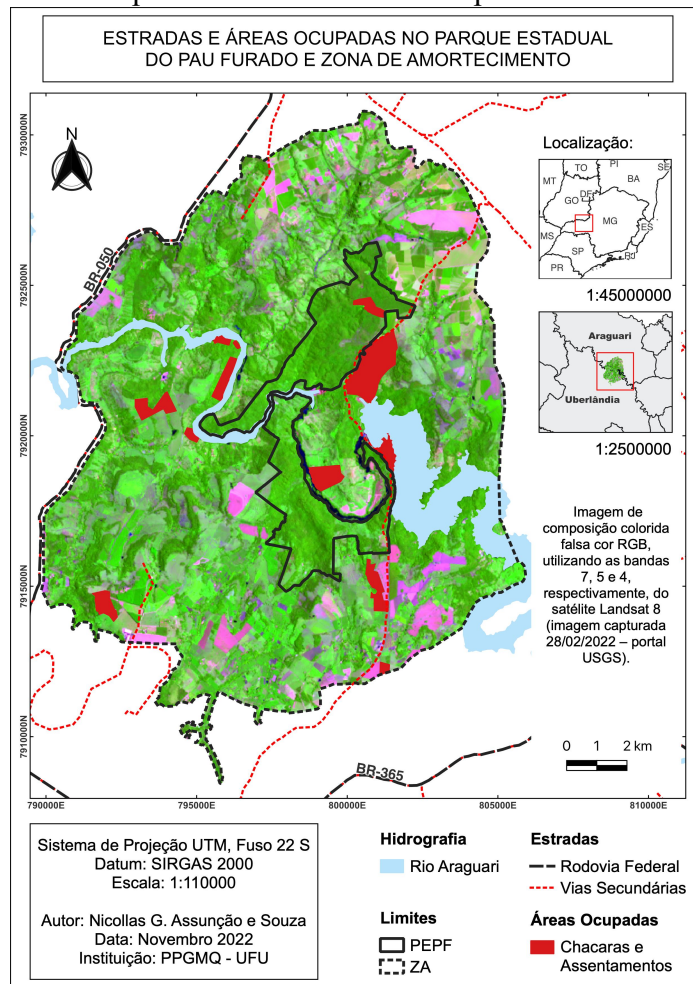
Fonte: O autor.

De acordo com Chang et al. (2015), a presença de atividades antrópicas influencia diretamente na frequência de incêndios florestais. Portanto, quanto maior o fluxo de pessoas em uma região, maior a suscetibilidade de ocorrência de incêndios florestais. Visto isso, se dá

a importância de identificar as rodovias, estradas e áreas urbanas próximas à área de estudo, as quais podem ser observadas na figura 5.

A BR-050 liga a capital federal ao litoral paulista, na cidade de Santos, é uma das rodovias federais com maior fluxo de veículos de carga (OLIVEIRA et al., 2020). Está contorna o extremo oeste da Zona de Amortecimento do PEPF. Além dela, existem ainda algumas vias municipais e estaduais no entorno do parque, onde também há algumas chácaras e assentamentos. A tabela 4 indica a suscetibilidade ao fogo de acordo com a proximidade de estradas e áreas urbanas.

Figura 5 – Mapa das estradas e áreas ocupadas na área de estudo.



Fonte: O autor.

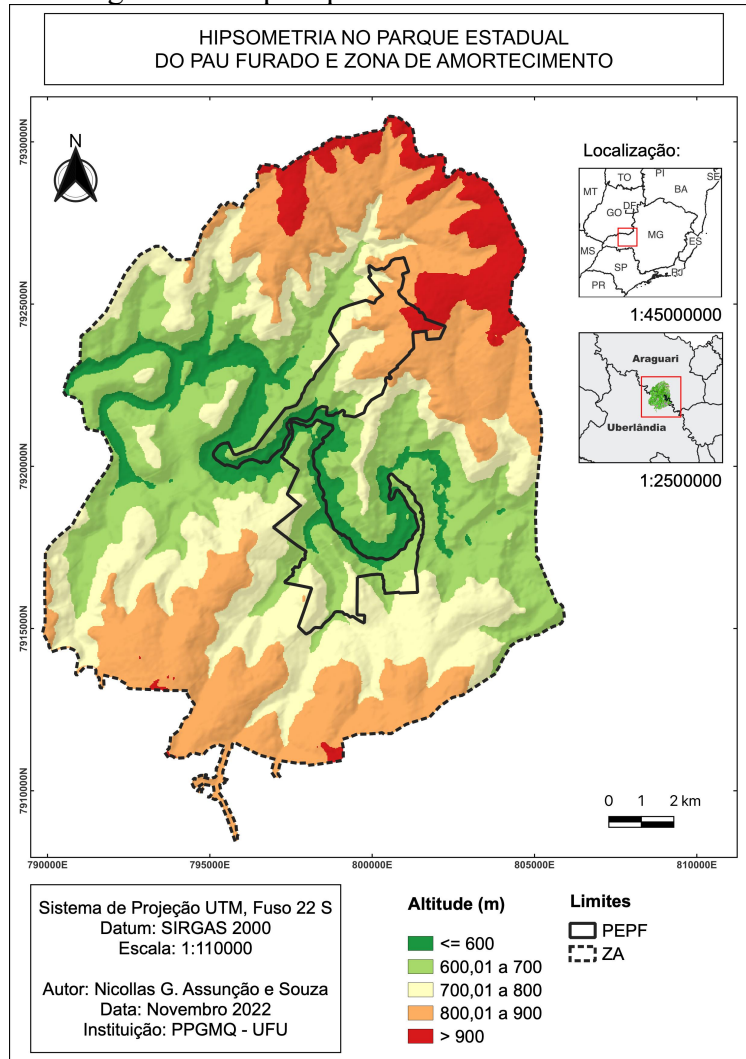
Tabela 4 – Área das classes, e nível de suscetibilidade ao fogo para as distâncias das estradas e áreas ocupadas na área de estudo.

Distância de Estradas e Assentamentos	Km²	%	Suscetibilidade
Distância Assentamentos < 150 (m)	4,23	1,86	Muito Alto
Distância Assentamentos 150,01 a 300 (m)	5,12	2,26	Alto
Distância Assentamentos 300,01 a 450 (m)	5,8	2,55	Moderado
Distância Assentamentos 450,01 a 600 (m)	6,36	2,79	Baixo
Assentamentos	6,01	2,65	Muito Alto
Distância Estradas < 150 (m)	7,08	3,12	Muito Alto
Distância Estradas 150,01 a 300 (m)	9,66	4,24	Alto
Distância Estradas 300,01 a 450 (m)	10,12	4,44	Moderado
Distância Estradas 450 a 600 (m)	10,64	4,67	Baixo
Distância Estradas e Assentamentos > 600 (m)	162,47	71,42	Muito Baixo
Total	227,49	100	

Fonte: O autor.

Com relação à hipsometria, esta tem uma relação inversamente proporcional à suscetibilidade de incêndios florestais. Sendo que, baixas altitudes apresentam maior suscetibilidade se comparadas às regiões mais elevadas. A figura 6 demonstra o mapa hipsométrico do parque.

Figura 6 – Mapa hipsométrico da área de estudo.



Fonte: O autor.

A tabela 5 expõe a suscetibilidade ao fogo segundo a elevação do terreno na área de estudo. O Parque Estadual do Pau Furado e sua Zona de Amortecimento tem uma variação de altitude entre 561,55 a 945,80 metros. As regiões mais elevadas se encontram ao norte do parque, enquanto que as áreas de menor altitude se situam próximas à margem do Rio Araguari.

Tabela 5 – Área das classes, e nível de suscetibilidade ao fogo para hipsometria na área de estudo.

Hipsometria	Km ²	%	Suscetibilidade
< 600 (m)	18,87	8,29	Muito Alto
600,01 a 700 (m)	66,16	29,08	Alto
700,01 a 800 (m)	60,99	26,81	Moderado
800,01 a 900 (m)	67,18	29,53	Baixo
> 900 (m)	14,29	6,29	Muito Baixo
Total	227,49	100	

Fonte: O autor.

No que diz respeito à orientação das vertentes, este demonstra indiretamente o teor de umidade do material combustível levando em consideração a irradiação solar, onde quanto maior a exposição solar, menor é a umidade da cobertura vegetal e, portanto, maior será a suscetibilidade ao fogo (PRUDENTE, 2016). Como a área de estudo se encontra no Hemisfério Sul, as faces voltadas para o norte são as que recebem mais incidência de raios solares. A figura 7 indica o mapa de orientação das encostas.

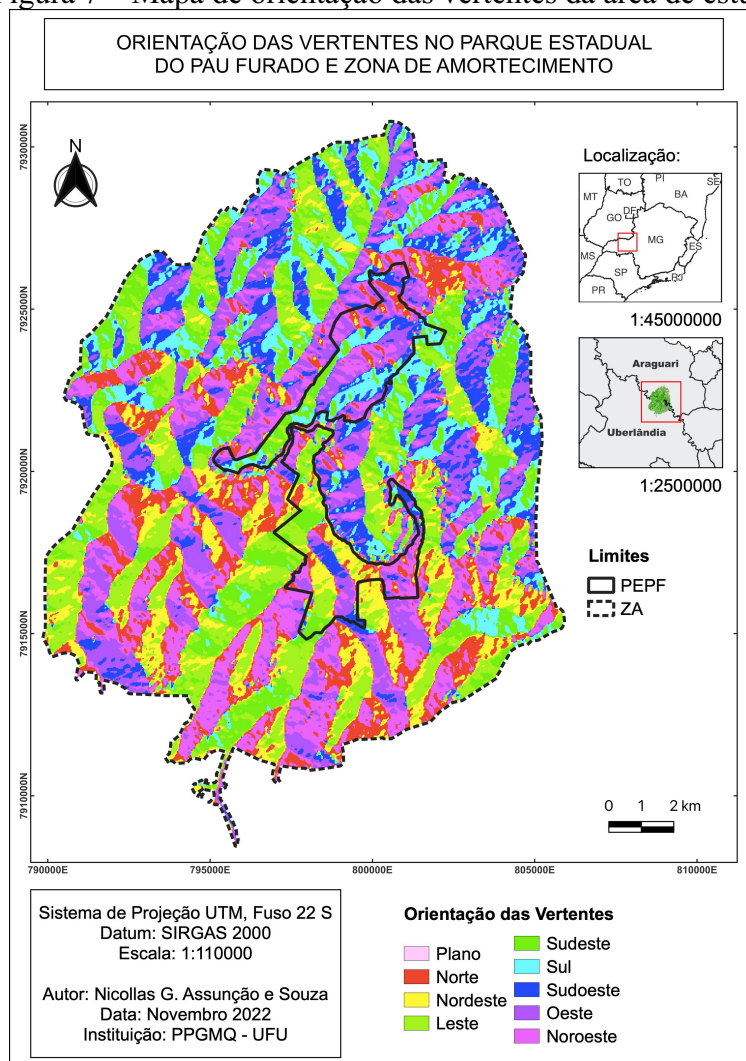
As regiões do parque que apresentam a exposição das encostas voltadas para o norte, nordeste e noroeste são aquelas que tem maior suscetibilidade à ocorrência de incêndios florestais. A tabela 6 aponta a suscetibilidade ao fogo para todas as faces.

Tabela 6 – Área das classes, e nível de suscetibilidade ao fogo para orientação das vertentes na área de estudo.

Vertentes	Km ²	%	Suscetibilidade
Norte	23,83	10,6	Muito Alto
Nordeste	20,99	9,35	Alto
Leste	32,81	14,6	Moderado
Sudeste	30,22	13,45	Baixo
Sul	21,19	9,44	Muito Baixo
Sudoeste	24,55	10,93	Baixo
Oeste	36,32	16,17	Moderado
Noroeste	34,73	15,46	Alto
Total	224,64	100	

Fonte: O autor.

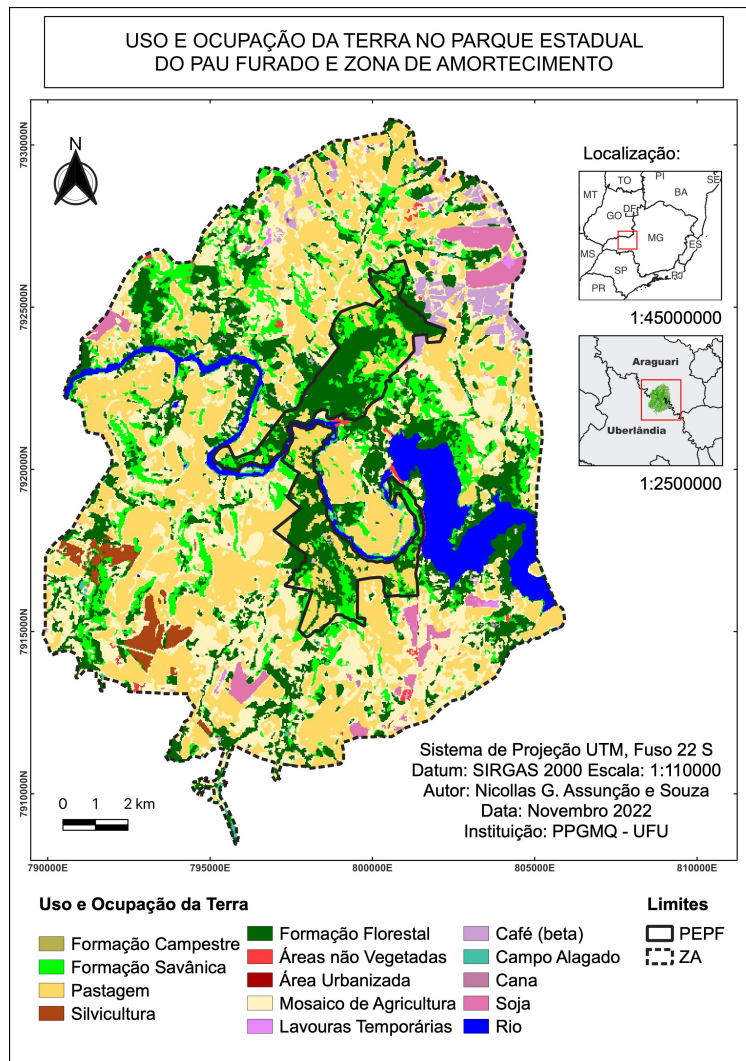
Figura 7 – Mapa de orientação das vertentes da área de estudo.



Fonte: O autor.

Para o mapa de uso e ocupação da terra, foram consideradas quatorze classes (de acordo com o Mapbiomas), sendo estas: Formação Campestre, Formação Savânicas, Pastagem, Silvicultura, Formação Florestal, Área Urbanizada, Café (beta), Campo Alagado e Área Pantanosa, Cana, Mosaico de Agricultura e Pastagem, Outras Áreas não Vegetadas, Outras Lavouras Temporárias, Soja, e por fim a classe de Rio, Lago e Oceano. Na figura 8 é possível verificar a distribuição destas classes na área de estudo. A suscetibilidade ao fogo para cada uma das classes de uso e ocupação da terra, pode ser observada na tabela 7.

Figura 8 – Mapa de uso e ocupação da terra da área de estudo (2020).



Fonte: O autor.

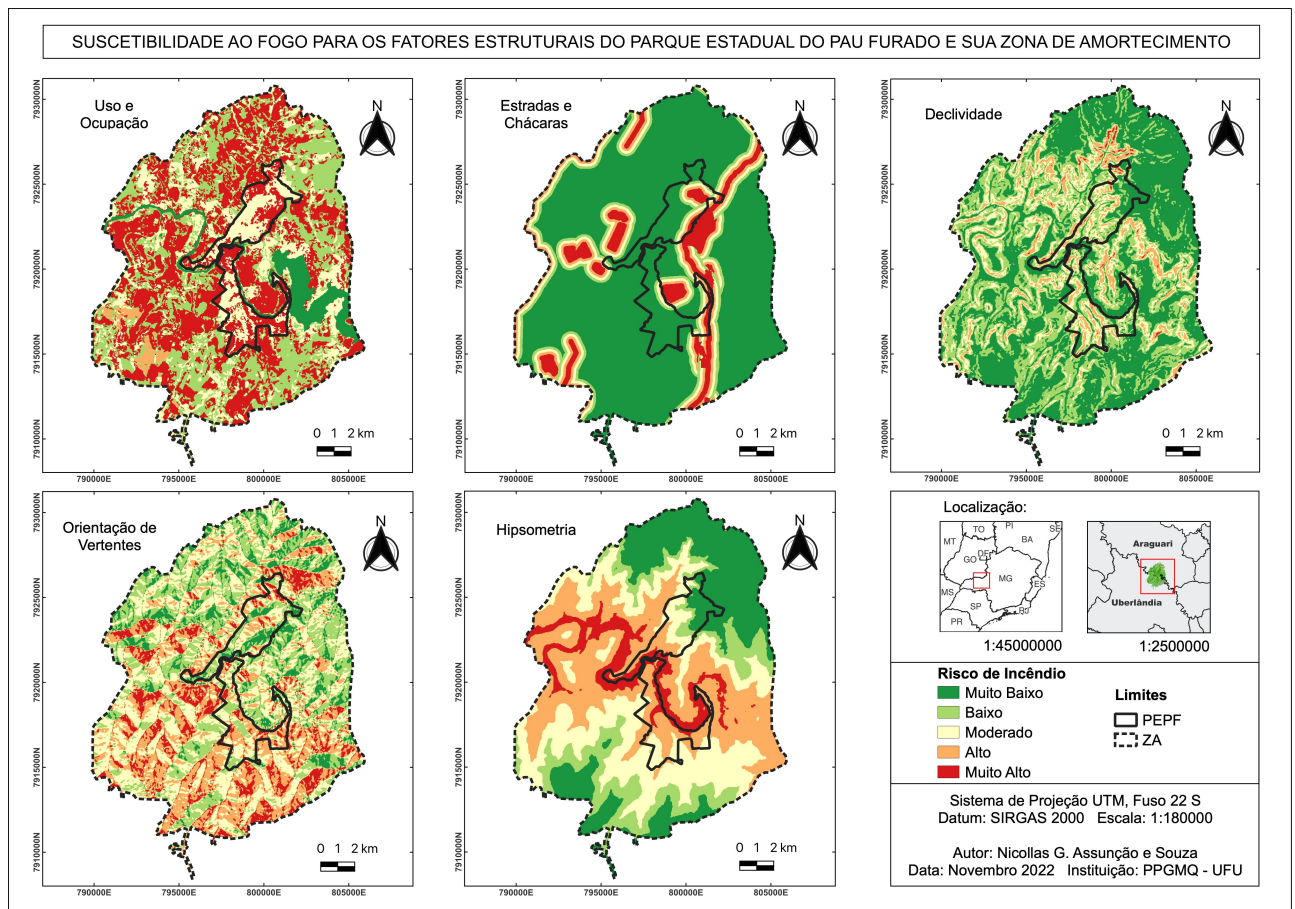
Tabela 7 – Área das classes, e nível de suscetibilidade ao fogo para uso e ocupação da terra na área de estudo.

Uso e Ocupação da Terra	Km²	%	Suscetibilidade
Formação Campestre	0,14	0,061	Muito Alto
Formação Savânicas	24,65	10,83	Muito Alto
Pastagem	68,16	29,97	Muito Alto
Silvicultura	3	1,32	Alto
Formação Florestal	45,07	19,82	Moderado
Área Urbanizada	0,0008	0,0003	Baixo
Café (beta)	4,31	1,89	Baixo
Campo Alagado e Área Pantanosa	0,94	0,41	Baixo
Cana	0,03	0,01	Baixo
Mosaico de Agricultura e Pastagem	61,69	27,13	Baixo
Outras Áreas não Vegetadas	1,07	0,47	Baixo
Outras Lavouras Temporárias	0,59	0,26	Baixo
Soja	5,03	2,21	Baixo
Rio, Lago e Oceano	12,76	5,61	Muito Baixo
Total	227,44	100	

Fonte: O autor.

Posteriori a elaboração dos mapas temáticos de cada um dos cinco fatores estruturais, e feita a reclassificação referente a suscetibilidade ao fogo para todas as variáveis analisadas, foram gerados os mapas de suscetibilidade ao fogo para os fatores estruturais (Figura 9).

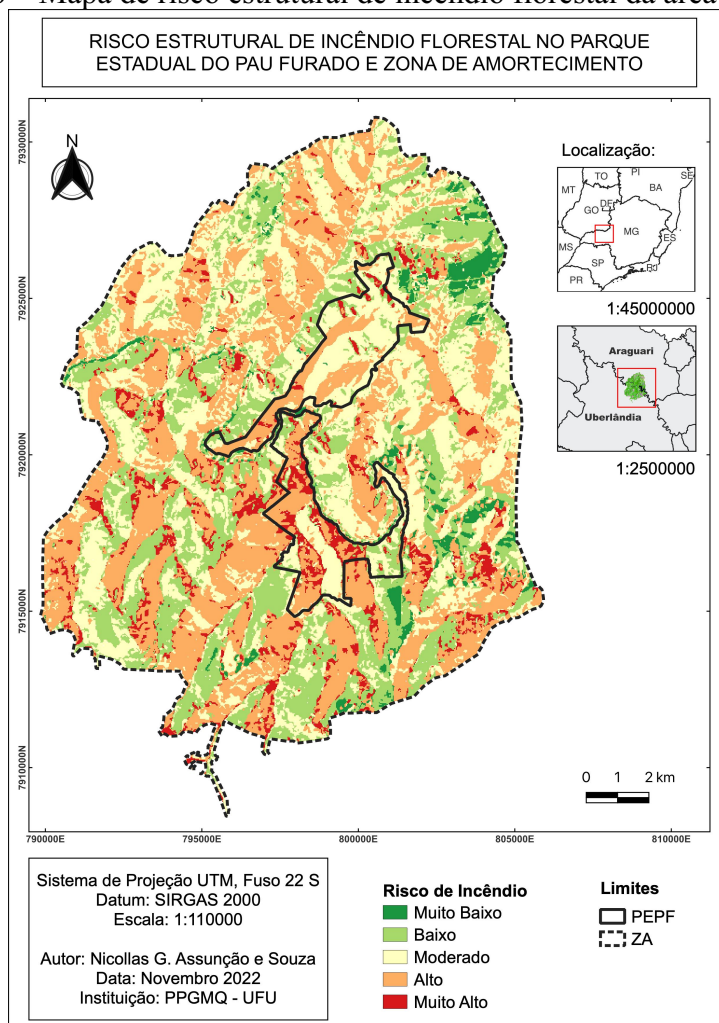
Figura 9 – Mapa de suscetibilidade ao fogo para os fatores estruturais da área de estudo.



Fonte: O autor.

A sobreposição dos cinco mapas de suscetibilidade ao fogo para os fatores estruturais, resultou no mapa de risco estrutural de incêndio florestal no Parque Estadual do Pau Furado e em sua Zona de Amortecimento. Este, foi elaborado levando em consideração o peso de cada uma das variáveis estruturais, e foi classificado em cinco classes de risco: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. A figura 10 apresenta o resultado final deste mapa.

Figura 10 – Mapa de risco estrutural de incêndio florestal da área de estudo.



Fonte: O autor.

Portanto, a partir do mapa exposto, pode-se afirmar que, levando em consideração somente os fatores estruturais, a área de estudo apresenta em sua maior parte um risco moderado (33,31% da área do parque) e alto (34,24%) de incêndios florestais (Tabela 8).

Tabela 8 – Área das classes de risco estrutural de incêndio florestal na área de estudo.

Risco Estrutural	Km ²	%
Muito Alto	13,86	6,18
Alto	76,77	34,24
Moderado	74,70	33,31
Baixo	52,25	23,3
Muito Baixo	6,66	2,97
Total	224,24	100

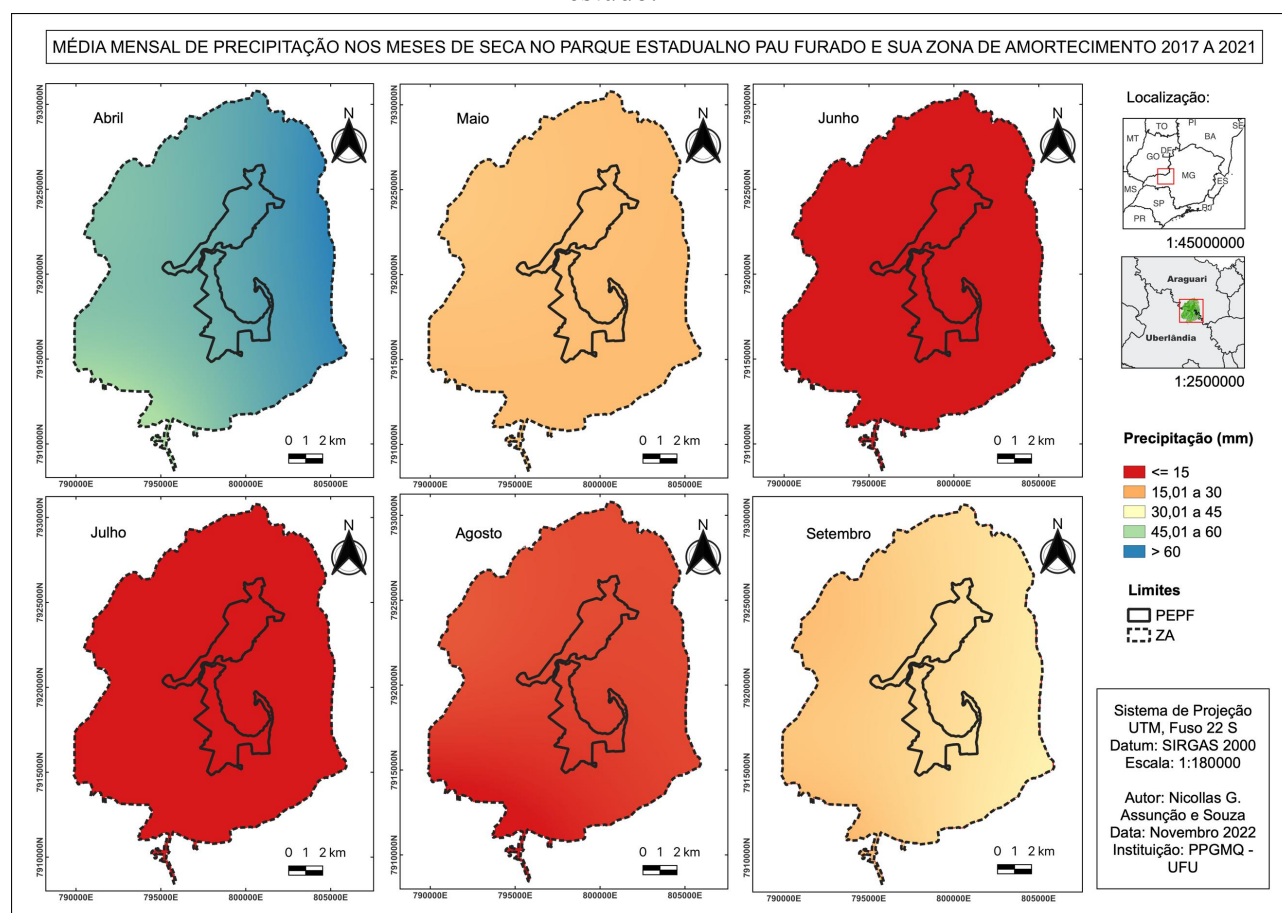
Fonte: O autor.

6.2 Risco Integrado de Incêndio Florestal

Como ilustrado anteriormente na figura 3, referente ao fluxograma para a elaboração do mapa de risco integrado, produto final desta pesquisa, é necessário primeiramente a construção dos mapas de precipitação para os meses de estiagem (abril, maio, junho, julho, agosto e setembro) durante o período estudado (2017 até 2022).

Para a geração dos mapas de precipitação, foram obtidos no portal Agritempo as informações de precipitação das estações meteorológicas no entorno do parque desde janeiro de 2017 a dezembro de 2021, após análise desses dados, foram elaborados os mapas de precipitação, que podem ser observados na figura 11.

Figura 11 – Mapas da média mensal de precipitação para os meses de estiagem na área de estudo.



Fonte: O autor.

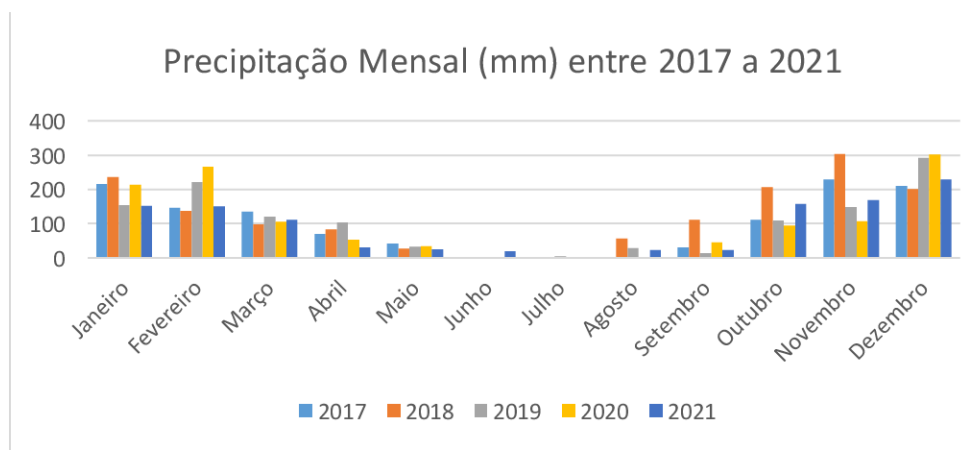
A região do parque apresenta características de clima tropical de savana – com inverno seco de maio a outubro, sendo julho o mês mais seco (EMBRAPA). Segundo Trewartha & Horn (1980, p. 235), para que um mês seja considerado seco, este deve ter uma precipitação média inferior à 55 mm (BELDA et al., 2014). Sendo assim, podemos observar na tabela 9 e também no gráfico 1, que os meses de maio, junho e julho apresentam características de mês seco em todo período analisado.

Tabela 9 – Valores de precipitação (mm) por ano e mês na área de estudo de 2017 a 2021.

Mês / Ano	2017	2018	2019	2020	2021	Total Mensal	Média Mensal
Janeiro	215,425	236,633	154,603	213,625	152,125	972,412	194,4823
Fevereiro	147,716	138,016	220,925	266,741	149,725	923,125	184,625
Março	136,325	98,091	120,083	106,175	111,166	571,841	114,3683
Abril	69,841	83,791	104,291	52,191	31,208	341,325	68,265
Mai	41,816	27,416	31,616	33,825	24,166	158,841	31,8133
Junho	1	0,841	0,966	0,55	19,583	22,941	4,5883
Julho	1,25	0,958	5,133	0,516	0,008	7,866	1,5733
Agosto	1,35	57,45	29,555	0,316	23,691	112,363	22,4725
Setembro	29,725	111,45	14,695	44,983	22,316	223,169	44,6341
Outubro	111,883	206,8	110,25	93,458	158,683	681,075	136,215
Novembro	229,641	304,991	149,5	107,025	169,758	960,916	192,1833
Dezembro	210,416	201,766	292,233	302,333	230,016	1236,766	247,3533
Total Anual	1196,391	1468,207	1233,853	1221,741	1092,449	6212,643	---
Média Anual	99,6992	122,3506	102,8210	101,8117	91,0374	---	---

Fonte: O autor.

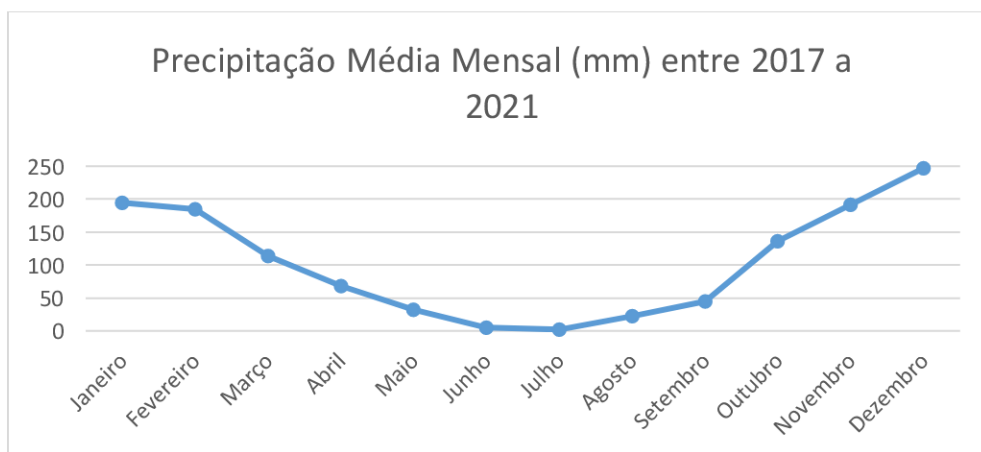
Gráfico 1 – Valores de precipitação (mm) por ano e mês na área de estudo de 2017 a 2021.



Fonte: O autor.

Já os meses de abril, agosto e setembro possuem precipitação inferior a 55mm apenas em alguns dos anos estudados, sendo que: o mês de abril foi seco somente nos anos de 2020(52mm) e 2021(31mm); agosto apresentou características de mês seco nos anos de 2017(1,3mm), 2019(29mm), 2020(0,30mm) e 2021(23mm); e o mês de setembro foi seco nos anos de 2017(29mm), 2019(14mm), 2020(44mm) e 2021(22mm). Pode-se verificar também que os meses de agosto e setembro não foram considerados meses de seca somente no ano de 2018, isto porque este foi o ano com maior valor de precipitação total anual no período analisado. No entanto, se levarmos em consideração o valor da média mensal de precipitação durante os anos de 2017 a 2021, o único destes meses que teve o valor de precipitação média mensal superior a 55mm foi o mês de abril, como pode ser notado no gráfico 2.

Gráfico 2 – Valores de precipitação média mensal (mm) na área de estudo de 2017 a 2021.



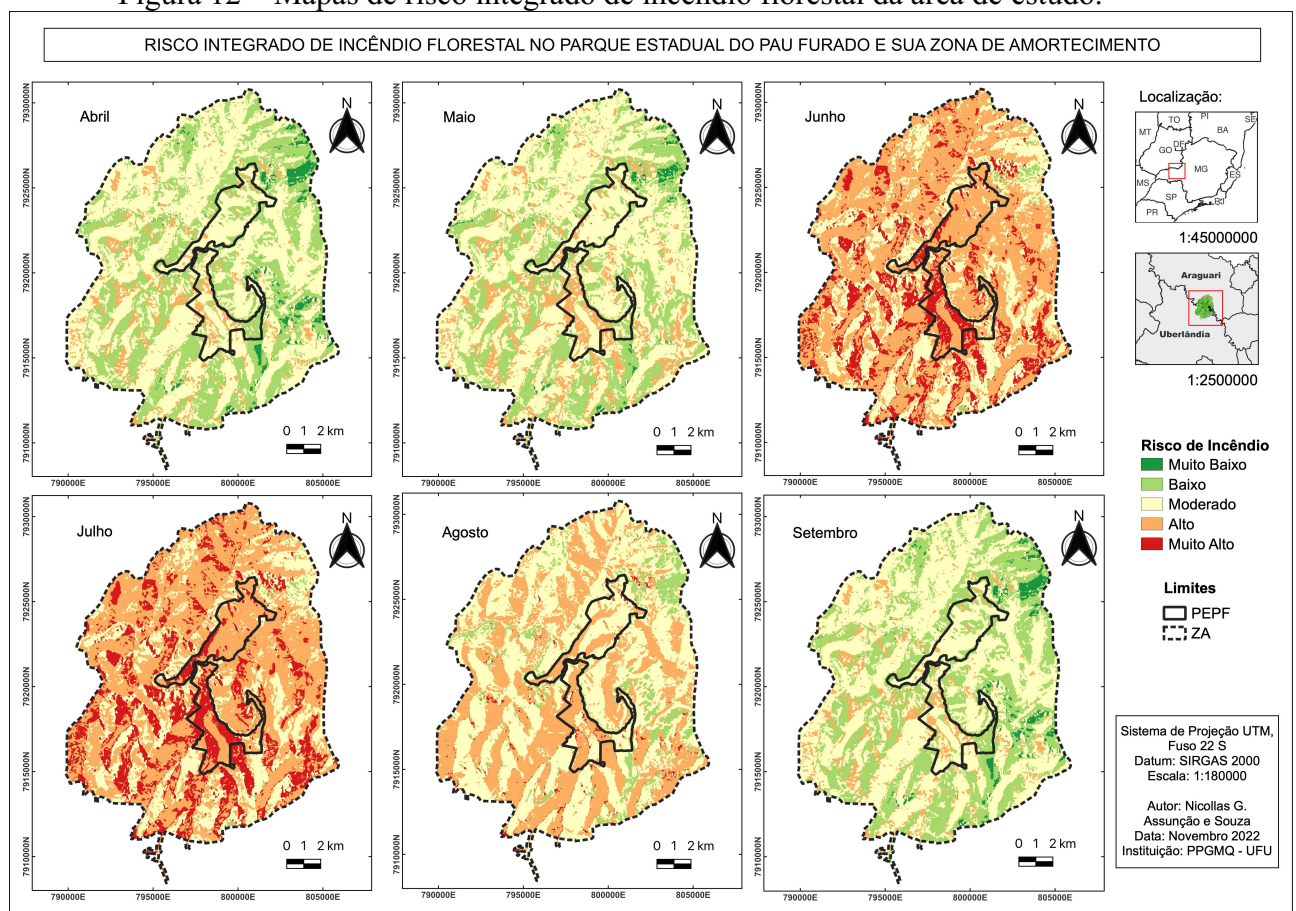
Fonte: O autor.

Os demais meses do ano não apresentaram característica de mês seco (média mensal de precipitação inferior à 55mm) em nenhum dos anos analisados. Por este motivo, os meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, não foram considerados na elaboração do mapa de risco de incêndios florestais no parque. No que diz respeito aos valores de precipitação por ano, a partir dos gráficos 1 e 2, e tabela 9, é possível observar que o ano de 2018 foi o de maior precipitação, por outro lado, o ano de 2021 foi aquele que apresentou o menor valor de precipitação.

Posteriori à conclusão dos mapas de precipitação, foi feita a reclassificação do coeficiente de suscetibilidade ao fogo para esta variável, sendo que quanto menor a

precipitação maior é o risco de fogo. Logo em seguida foi realizada a integração dos mapas de suscetibilidade ao fogo das variáveis estruturais, com os mapas de suscetibilidade ao fogo da precipitação no período estudado. Essa integração foi produzida como consequência da combinação linear ponderada, onde a distribuição dos pesos foi atribuída a partir do processo analítico hierárquico, apresentada na tabela 2. Finalmente, a conclusão destas etapas resultará no mapa de risco integrado de incêndio florestal no PEPF e sua ZA, para os meses de seca, figura 12.

Figura 12 – Mapas de risco integrado de incêndio florestal da área de estudo.



Fonte: O autor.

Observando os mapas, é nítido que os meses de junho e julho são aqueles que apresentam maior risco de incêndio florestal na área de estudo. Isto também pode ser confirmado, a partir das informações apresentadas na tabela 9. A maior suscetibilidade à ocorrência de incêndios nestes dois meses, se dá devido ao baixo número de precipitação. Sendo que em junho, o maior valor de precipitação nos cinco anos observados foi 8,78mm; e no mês de julho o maior valor de precipitação foi 3,02mm. Em contrapartida, se observarmos

o mês de abril, este apresenta menor risco de ocorrência de incêndio florestal, isto porque, seu menor valor de precipitação nos cinco anos observado foi de 52,48mm.

Tabela 10 – Área das classes de risco integrado de incêndio florestal na área de estudo.

Risco Integrado	Abril		Maio		Junho		Julho		Agosto		Setembro	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Muito Alto	0	0	0	0	38,18	17,03	47,98	21,41	3,01	1,346	0	0
Alto	0	0	31,20	13,9	124,74	55,66	123,09	54,92	92,05	41,07	19,05	8,50
Moderado	26,02	11,6	125,58	56,03	59,35	26,48	51,95	23,18	112,52	50,21	122,39	54,62
Baixo	124,12	55,4	65,06	29,04	1,85	0,83	1,10	0,49	16,53	7,37	77,33	34,50
Muito Baixo	73,98	33	2,28	1,03	0	0	0	0	0,01	0,004	5,35	2,38
Total	224,12	100	224,12	100	224,12	100	224,12	100	224,12	100	224,12	100

Fonte: O autor.

6.3 Focos de Calor

A fim de aferir a credibilidade do produto gerado, foi feita uma análise com relação aos focos de calor detectados pela plataforma BDQueimadas (Banco de Dados de Queimadas - INPE). Esta plataforma identifica, a partir do processamento automático de imagens obtidas com satélites, os focos de calor que ocorrem na superfície. Desta forma, na tabela 11 e na figura 13 foi possível observar os focos registrados pelo Banco de Dados de Queimadas na região do Parque Estadual do Pau Furado durante o período estudado.

Como declarado anteriormente, os meses chuvosos (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro) não apresentam risco de ocorrência de incêndios florestais, portanto, também não apresentam focos de calor. O que é possível confirmar na tabela 11, com exceção, no entanto, do mês de outubro, o qual segundo a plataforma BDQueimadas apresentou focos de calor para os anos de 2019, 2020 e 2021.

Já com relação aos meses de estiagem, estes seguiram um comportamento como sugerido no Mapa de Risco Integrado (Figura 12). Onde, exceto o mês de abril, todos os meses apresentaram detecção de focos de calor.

Tabela 11 – Focos de calor detectados na área de estudo, de 2017 a 2021.

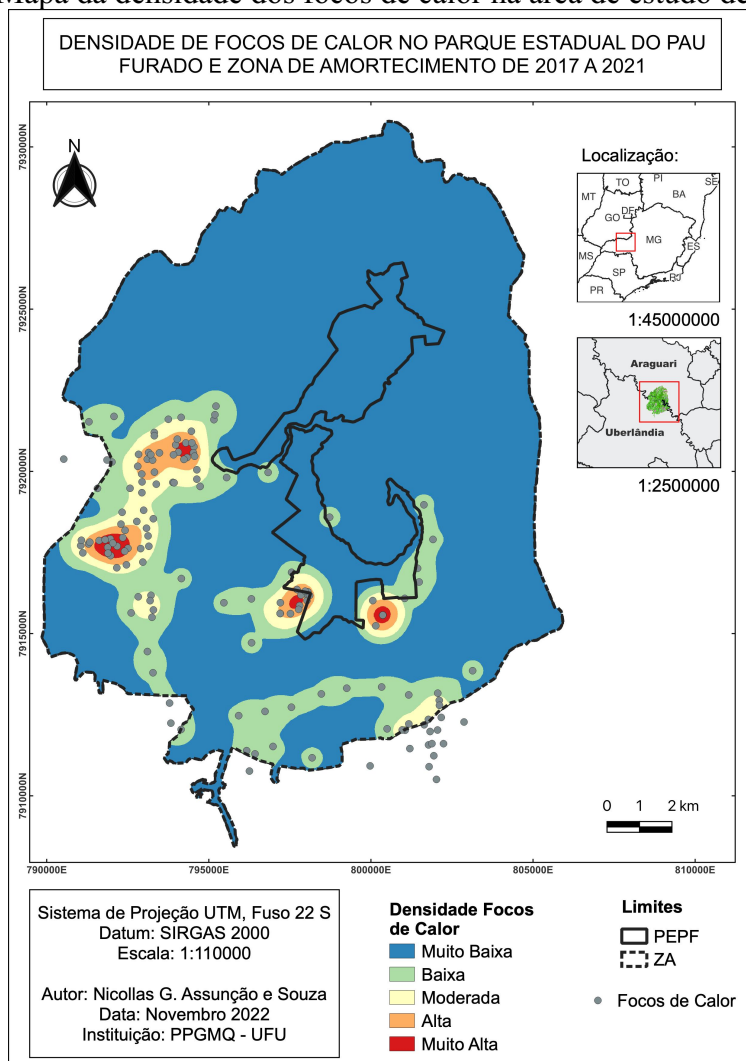
Mês / Ano	2017	2018	2019	2020	2021	Total Mensal
Janeiro	0	0	0	0	0	0
Fevereiro	0	0	0	0	0	0
Março	0	0	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0	0	0
Maió	0	0	0	1	1	2
Junho	2	0	6	2	1	11
Julho	4	0	0	0	2	6
Agosto	1	0	3	0	5	9
Setembro	1	5	42	10	15	73
Outubro	0	0	7	48	1	56
Novembro	0	0	0	0	0	0
Dezembro	0	0	0	0	0	0
Total Anual	8	5	58	61	25	157

Fonte: O autor.

Em referência à disposição espacial dos focos de calor identificados pelo BDQueimadas, estes se dão todos na parte sul do parque, o que pode ser observado na figura 13. Isto confirma o resultado apresentado no Mapa de Risco Estrutural (Figura 10), onde as áreas com risco muito alto de incêndio florestal se apresentam em sua maioria na região sul do PEPF.

Importante destacar que, segundo o manual da plataforma BDQueimadas, as contagens de focos do INPE são excelentes indicadores da ocorrência de fogo na vegetação, porém, não devem ser consideradas como medida absoluta da ocorrência de fogo. Ou seja, nem todo foco de calor é referente a uma ocorrência real de incêndio florestal, e nem todo incêndio florestal é detectado pela plataforma.

Figura 13 – Mapa da densidade dos focos de calor na área de estudo de 2017 a 2021.



Fonte: O autor.

Resumidamente então, existe assim algumas semelhanças apresentadas na comparação dos mapas de risco de incêndio com as informações de focos de calor detectados pelo BDQueimadas. Apesar dos meses de setembro e outubro apresentarem informações distantes, os outros meses do ano apresentam características semelhantes. Além disso, no que diz respeito à região do parque com maior suscetibilidade à ocorrência de incêndios florestais, os mapas de risco gerados neste trabalho e o mapa dos focos de calor apresentam um mesmo resultado.

7 CONCLUSÃO

Diversas são as variáveis que podem ser analisadas na elaboração do mapa de risco de incêndios florestais. Durante a execução do presente trabalho, foi notada a diferença na relevância que algumas variáveis tinham sobre outras, no contexto como fatores facilitadores na ocorrência de incêndios florestais. O conhecimento das características da área de estudo é crucial para a escolha das variáveis aplicadas na elaboração dos mapas de risco. Dito isso, a variável hipsometria poderia ser descartada nesta pesquisa pois, a literatura menciona que as zonas de menor elevação têm maior suscetibilidade ao fogo por apresentarem solo e vegetação com menor humidade, no entanto, na área de estudo as zonas de menor elevação estão próximas de um corpo d'água, o que aumenta a humidade do solo e vegetação, dificultando a combustão do material combustível.

Com relação as demais variáveis aplicadas na elaboração dos mapas de risco, todas demonstraram ter um grau de importância relevante. Como há vários morros e vales na área do parque e sua zona de amortecimento, a análise das variáveis orientação das vertentes e declividade, se mostra pertinente. Orientação das vertentes é responsável pela identificação das encostas que recebem maior incidência solar, conseqüentemente, maior suscetibilidade ao fogo. A declividade é necessária para apontar as zonas onde há maior aclave, sendo essas propícias para a propagação das chamas. Existem na área de estudo algumas estradas e chácaras, como a presença do homem é fator preponderante na ocorrência de incêndios, se vê necessária a delimitação das regiões mais próximas destas áreas. No que diz respeito às variáveis uso e ocupação da terra, e precipitação, estas se apresentam significantes independente das características da área de estudo.

O uso e ocupação da terra expressa a tipologia da cobertura vegetal da área de estudo. Tal informação é crucial na elaboração do mapa de risco de incêndio, porque as características da cobertura vegetal indicam se há, ou não, material combustível para dar início ou propagar o fogo. Além disso, as propriedades do material combustível, que varia de acordo com a tipologia da cobertura vegetal, apontam o comportamento do fogo. Neste trabalho, as classes que apresentaram maior suscetibilidade ao fogo foram aquelas com características de formações vegetais campestres, savânicas e pastagens.

A precipitação é fator determinante na ocorrência de incêndios florestais, e isto se dá ao fato da precipitação ser responsável direto na umidade e inflamabilidade da cobertura vegetal. Contudo, fator importante a se destacar é que, a suscetibilidade ao risco de incêndio florestal não se dá instantaneamente no início do período de estiagem. De acordo com os mapas de risco integrado, a maior probabilidade de ocorrência de incêndios florestais se dá nos meses de junho e julho, por apresentarem menor precipitação. Porém, os focos de calor foram detectados em maior número nos meses de setembro e outubro. Dessa forma, podemos indagar que, além do valor de precipitação, o intervalo de tempo em que essa precipitação apresenta valores baixos (déficit hídrico), também pode ser relevante para o estudo da vulnerabilidade ao fogo. Isto porque após um período acumulado de baixa, ou nenhuma, precipitação, o solo e a vegetação encontram-se em um estado seco, resultando em um material combustível de grande potencialidade para a ignição ou propagação do fogo.

Assim sendo, a metodologia empregada para a geração dos mapas de risco neste trabalho, pode auxiliar como uma das ferramentas na tomada de decisão para conservação do parque em estudo e de outros. Para isso, é imprescindível a escolha das variáveis de influência a serem aplicadas em pesquisas futuras a fim de considerar as características da área de estudo, tomando as variáveis uso e ocupação da terra, e precipitação, como fundamentais na elaboração do mapa de risco de incêndio. Além disso, como observado nas datas de ocorrência dos focos de calor detectados pelo INPE, outra variável pertinente na elaboração do mapa de risco de incêndio é o déficit hídrico.

Em conclusão, com base no Mapa de Risco Estrutural, é possível identificar as regiões dentro da unidade de conservação que possuem maior vulnerabilidade ao fogo, independente da época do ano. A partir desta informação, pode-se dar início na elaboração de medidas preventivas e de combate à ocorrência de incêndios no parque. Dentre as medidas de prevenção, podemos destacar: a construção de aceiros, a instalação de hidrantes próximas às áreas mais susceptíveis ao fogo, e até mesmo a utilização do manejo integrado do fogo (acompanhado por responsáveis do parque e corpo de bombeiros). Por fim, fundado nos resultados alcançados neste trabalho, se apresenta uma ferramenta para auxiliar na prevenção de incêndios florestais no Parque Estadual do Pau Furado, a qual é essencial para a preservação das espécies que ali convivem, e continuidade na proteção da biodiversidade presente na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.

REFERÊNCIAS

AKAY, Abdullah Emin; ŞAHİN, Halil. Forest fire risk mapping by using GIS techniques and AHP method: a case study in Bodrum (Turkey). **European Journal of Forest Engineering**, v. 5, n. 1, p. 25-35, 2019. DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.579075>. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ejfe/issue/45835/579075>. Acesso em: 6 jan. 2022.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Disponível em: https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref. Acesso em: 19 set. 2021.

ARRUDA, Vera Láisa da Silva *et al.* An alternative approach for mapping burn scars using Landsat imagery, Google Earth Engine, and Deep Learning in the Brazilian Savanna. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, p. 100472, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100472>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938521000082?via%3Dihub>. Acesso em: 22 ago. 2021.

ATLÂNTICA, SOS Mata. **Mata Atlântica**. Fundação SOS Mata Atlântica, Sao Paulo, 1992.

BELDA, Michal *et al.* Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha. **Climate research**, v. 59, n. 1, p. 1-13, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01204>. Disponível em: <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v59/n1/p1-13/> Acesso em: 11 fev. 2022.

BENGUERAI, Abdelkader *et al.* Forest Fire Risk Assessment Model Using Remote Sensing and GIS Techniques in Northwest Algeria. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica: An International Journal in Forest, Wood and Environmental Sciences**, v. 15, n. 1, p. 9-21, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2478/aslh-2019-0001>. Disponível em: <http://real.mtak.hu/107058/1/10.2478-aslh-2019-0001.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2022.

BRASIL. Lei n. 9.985, de 3 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. MARCO ANTONIO DE OLIVEIRA MACIEL Brasília, 18 de julho de 2000; 179º da Independência e 112º da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9985.htm. Acesso em: 26 abr. 2021.

BUTT, Amna *et al.* Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 18, n. 2, p. 251-259, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.07.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982315000332?via%3Dihub>. Acesso em: 7 jul. 2022.

CHANG, Yu *et al.* Environmental controls on the characteristics of mean number of forest fires and mean forest area burned (1987–2007) in China. **Forest Ecology and Management**, v. 356, p. 13-21, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037811271500393X?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jun. 2021

CHUVIECO, Emilio *et al.* Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 1, p. 46-58, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380008005735?via%3Dihub>. Acesso em: 29 mai. 2021.

EUGENIO, Fernando Coelho *et al.* Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of environmental management**, v. 173, p. 65-71, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479716300627?via%3Dihub>. Acesso em: 7 dez. 2021.

FELGUEIRAS, João José da Silva. **Evolução do risco de Incêndio Florestal**. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Riscos Naturais) – Universidade do Porto, Porto, 2005.

FERNANDES, Manoel do Couto *et al.* Avaliação geocológica de susceptibilidade à ocorrência de incêndios no estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Floresta e Ambiente**.v,18, n.3, p. 299-309, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4322/floram.2011.050>. Disponível em: <https://floram.org/doi/10.4322/floram.2011.050>. Acesso em: 18 set. 2021

FIEDLER, Nilton César *et al.* Avaliação das condições de trabalho, treinamento, saúde e segurança de brigadistas de combate a incêndios florestais em unidades de conservação do Distrito Federal: estudo de caso. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 55-63, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000100008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/GvRvjw5TLM4DCDyRB9djD5s/?lang=pt>. Acesso em: 7 jul. 2021.

FRAGAL, Everton Hafemann. **Dinâmica de queimadas em áreas úmidas protegidas e relações com fatores ambientais e antrópicos: o Parque Nacional de Ilha Grande (PR-MS)**. 2018. Tese (doutorado em Geografia) – Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Estadual de Maringá, Paraná, 2018.

FRANCO, Renato Alberto Momesso *et al.* O uso da análise multicritério para a definição de áreas prioritárias a restauração de Área de Preservação Permanente (APP), no noroeste paulista. *In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR*, 16., 2013, Foz do Iguaçu-PR. Anais [...]. Foz do Iguaçu, PR: INPE, 2013.

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM. **National Geographic Society**, 2022. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/geographic-information-system-gis>. Acesso em: 21out. 2022.

GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro; GOMES, Carlos Francisco Simões. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. Editora Atlas SA, 2000.

GUIMARÃES, Pompeu *et al.* Análise dos impactos ambientais de um incêndio florestal. **Agrarian Academy**, v. 1, n. 01, 2014. DOI: https://doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2014_005. Disponível em:

<http://www.conhecer.org.br/Agrarian%20Academy/2014a/analise%20dos%20impactos.pdf>.

Acesso em: 29 mai. 2021.

HEYWOOD, Ian; CORNELIUS, Sarah; CARVER, Steve. **An introduction to geographical information systems**. Harlow: Prentice Hall, 2002.

HOFFMANN, William A. *et al.* Tree topkill, not mortality, governs the dynamics of savanna–forest boundaries under frequent fire in central Brazil. **Ecology**, v. 90, n. 5, p. 1326-1337, 2009.

DOI: <https://doi.org/10.1890/08-0741.1>. Disponível em:

<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/08-0741.1>. Acesso em: 29 mai.

2021.

IEF- INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS De Minas Gerais. 2011. **Plano de manejo do Parque Estadual Do Pau Furado**. Uberlândia, 228 p. Disponível em: <https://linktr.ee/ParqueEstadualDoPauFurado>. Acesso em: 26 abr. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INEP. **Programa de queimadas: perguntas frequentes**. Brasília, DF, 2020. Portal. Disponível em: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/perguntas-frequentes>. Acesso em: 10 jul. 2022.

JAISWAL, Rajeev Kumar *et al.* Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 4, n. 1, p. 1-10, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(02)00006-5). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243402000065?via%3Dihub>.

Acesso em: 7 jul. 2022.

JENSEN, John R.; IM, Jungho. Remote sensing change detection in urban environments. **Geo-spatial technologies in urban environments**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p. 7-31.

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69417-5_2. Disponível em:

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-69417-5_2. Acesso em: 21 out. 2022.

KGANYAGO, Mahlatse; SHIKWAMBANA, Lerato. Assessment of the characteristics of recent major wildfires in the USA, Australia and Brazil in 2018–2019 using multi-source satellite products. **Remote Sensing**, v. 12, n. 11, p. 1803, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12111803>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/11/1803>. Acesso em: 20 ago. 2022.

KLINK, Carlos A.; MACHADO, Ricardo B. Conservation of the Brazilian cerrado. **Conservation biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>. Disponível em: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>. Acesso em: 21 out. 2022.

KUTER, Nazan *et al.* Forest fire risk mapping by kernel density estimation. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 32, n. 2, p. 599-610, 2011. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/file/108160>. Acesso em: 24 ago. 2021.

LI, Miao *et al.* A review of remote sensing image classification techniques: The role of spatio-contextual information. **European Journal of Remote Sensing**, v. 47, n. 1, p. 389-411, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5721/EuJRS20144723>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5721/EuJRS20144723>. Acesso em: 10 jul. 2022.

LONGLEY, Paul A. *et al.* Sistemas e ciência da informação geográfica. Porto Alegre: **Bookman Editora**, 2013.

MIRANDA, Heloisa Sinátorá *et al.* Comportamento do fogo em queimadas de campo sujo. **Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga**, p. 1-10, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

MIRANDA, José Iguelmar. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

NETO, Arlindo de Paula Machado *et al.* Incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães-MT entre 2005 e 2014. **Nativa**, v. 5, n. 5, p. 355-361, 2017. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v5i5.4684>. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/4684>. Acesso em: 10 nov. 2022.

NUTHAMMACHOT, Narissara; STRATOULIAS, Dimitris. A GIS-and AHP-based approach to map fire risk: a case study of Kuan Kreng peat swamp forest, Thailand. **Geocarto International**, v. 36, n. 2, p. 212-225, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1611946>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10106049.2019.1611946>. Acesso em: 10 mar. 2022.

NUTHAMMACHOT, Narissara; STRATOULIAS, Dimitris. Multi-criteria decision analysis for forest fire risk assessment by coupling AHP and GIS: method and case study. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 12, p. 17443-17458, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01394-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-021-01394-0>. Acesso em: 10 mar. 2022.

OLIVEIRA, Tiago Moreira de. **Monitoramento dos focos de calor e do risco de incêndios florestais no município de Ituiutaba-MG**. 2019. 126 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.652>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27048>. Acesso em: 26 abr. 2021.

OLIVEIRA, Wilson Junior *et al.* Caracterização da fauna helmintológica de tamanduá-bandeira (*Myrmecophaga tridactyla*) e tamanduá-mirim (*Tamandua tetradactyla*) atropelados nas rodovias BR-050 e BR-455 (Minas Gerais, Brasil). **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 72, p. 2175-2185, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-11833>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abmvz/a/dfSVMYnmttLyRp4qh7dVSrp/?lang=pt>. Acesso em: 22 ago. 2021.

PEZZOPANE, José Eduardo Macedo *et al.* Risco de incêndios em função de característica do clima, relevo e cobertura do solo. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 161 - 6, 2001.

PIMENTA, Lianne Borja *et al.* Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações (Campo Grande)**, v. 20, p. 407-420, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20435/inter.v20i2.1856>. Disponível em: <https://interacoesucdb.emnuvens.com.br/interacoes/article/view/1856>. Acesso em: 7 dez. 2021.

PIVELLO, Vânia R. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: past and present. **Fire ecology**, v. 7, n. 1, p. 24-39, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4996/fireecology.0701024>. Disponível em: <https://fireecology.springeropen.com/articles/10.4996/fireecology.0701024>. Acesso em: 7 jul. 2022.

PRUDENTE, Tatiana Diniz. **Risco integrado de incêndio florestal em áreas de cerrado: contribuições metodológicas**. 2016. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2016.45>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16019>. Acesso em: 26 abr. 2021.

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro *et al.* Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. **Journal of environmental management**, v. 296, p. 113122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113122>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721011841?via%3Dihub>. Acesso em: 13 fev. 2022.

RIBEIRO, Luciene *et al.* Mapeamento do risco de incêndios florestais no município de Novo Mundo, Mato Grosso, Brasil. **Cerne**, v. 18, p. 117-126, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000100014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/tSznMT44QSWd835wjgWk5dM/?lang=pt>. Acesso em: 21 out. 2022.

ROSA, Roberto. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81-90, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0009>. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47288>. Acesso em: 29 mai. 2021.

SAIDI, Salwa *et al.* A GIS-remote sensing approach for forest fire risk assessment: case of Bizerte region, Tunisia. **Applied Geomatics**, v. 13, n. 4, p. 587-603, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-021-00369-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-021-00369-0>. Acesso em: 10 nov. 2022.

SILVA, Jorge Xavier da; ZAIDAN, Ricardo Tavares. **Geoprocessamento & Análise Ambiental**: aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

SILVA, Leticia Gomes da. **Comportamento e efeito do fogo sobre os ecossistemas do bioma cerrado**: modelos baseados em processos. 2018. xi, 112 f., il. Tese (Doutorado em Ecologia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SINGH, Minerva; HUANG, Zhuhua. Analysis of forest fire dynamics, distribution and main drivers in the Atlantic Forest. **Sustainability**, v. 14, n. 2, p. 992, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14020992>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/2/992>. Acesso em: 22 ago. 2021.

Sistema de Monitoramento Agrometeorológico – Agritempo (Embrapa). Julho 2015. **Manual on-line do sistema Agritempo versão 2.0**. Campinas, SP. Disponível em: https://www.agritempo.gov.br/agritempo/arquivos/Manual_Agritempo.pdf. Acesso em: 01 jun. 2022.

SIVRIKAYA, Fatih *et al.* Evaluation of forest fire risk with GIS. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 23, 2014. Disponível em: <https://avesis.ktu.edu.tr/yayin/665fca6b-e91a-4bc7-9b05-90579403791b/evaluation-of-forest-fire-risk-with-gis>. Acesso em: 27 ago. 2022.

SOARES, Ronaldo Viana; SANTOS, Juliana Ferreira. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1994 a 1997. **Floresta**, v. 32, n. 2, 2002. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v32i2.2287>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2287>. Acesso em: 23 ago. 2021.

SOUSA, Juliana Valença *et al.* Uso do AHP para identificação de perdas da qualidade em empresas de manufatura: um estudo de caso. **Exacta**, v. 15, n. 1, p. 89-100, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5585/exactaep.v15n1.6691>. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/810/81050129007.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2022.

TONINI, Marj *et al.* A machine learning-based approach for wildfire susceptibility mapping. The case study of the Liguria region in Italy. **Geosciences**, v. 10, n. 3, p. 105, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10030105>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/10/3/105>. Acesso em: 23 ago. 2021.

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira *et al.* Análise do perfil dos incêndios florestais no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro e entorno (MG). **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1008-1021, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509833384>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/33384>. Acesso em: 24 ago. 2021.

WHAT IS GIS. **ESRI**, 2022. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview>. Acesso em: 21out. 2022.