

**ABORDAGEM BASEADA EM SIG APLICADA AO ESTUDO DO RISCO DE INCÊNDIO FLORESTAL EM UMA ÁREA DE CONSERVAÇÃO NA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO****GIS-BASED APPROACH APPLIED TO THE STUDY OF FOREST FIRE RISK IN A CONSERVATION AREA IN THE TRIÂNGULO MINEIRO REGION**Ana Tereza Guimarães dos Santos<sup>1</sup>, Daniel Pena Pereira<sup>1</sup>, Maytê Maria Abreu Pires de Melo Silva<sup>1</sup>, Fausto Antônio Domingos Junior<sup>1</sup>

e2315284

<https://doi.org/10.33947/geociencias.v23i1.5284>

PUBLICADO: 1/2025

**RESUMO**

Mapas de risco de ocorrências de incêndios florestais (ROIF) indicam áreas mais vulneráveis às ocorrências da eclosão do fogo, podendo auxiliar no planejamento, gestão da prevenção ao surgimento dos incêndios. O objetivo geral deste trabalho foi a aplicação da lógica fuzzy para o mapeamento de risco de ocorrência de incêndios florestais no Parque Estadual do Pau Furado e sua zona de amortecimento. O Parque Estadual do Pau Furado, na região do Triângulo Mineiro, tem uma área de 2.184,9394 ha e está localizado entre os municípios de Uberlândia e Araguari. Foi utilizado um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para o zoneamento de risco de ocorrência de incêndios florestais (ROIF) no entorno da área de estudo. As variáveis consideradas para elaborar esse mapa de risco foram o uso e cobertura do solo, altura, declividade, orientação do relevo, proximidade de estradas, precipitação e temperatura. As causas dos incêndios florestais nas Unidades de Conservação têm sido principalmente devido ao uso incorreto do fogo por pessoas, para renovação de pastagens e limpeza de restos de culturas em propriedades vizinhas. Assim, o mapa de risco validou a ocorrência de focos de incêndios ao redor do parque em questão nos anos de 2019 e 2020 através de imagens de satélite, que se iniciaram em proximidade a estradas e áreas de pastagens vizinhas. A área de estudo apresentou cerca de 64,5% referentes às classes de risco muito elevado a elevado, agrupando uma área de 14.639 hectares.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lógica fuzzy. Parque Estadual. Unidades de conservação. SIG.**ABSTRACT**

*Risk maps of forest fire occurrences (ROIF) indicate areas that are more vulnerable to the occurrence of fire outbreaks, which can help in planning and managing the prevention of fire outbreaks. The general objective of this work is the application of fuzzy logic for mapping the risk of forest fires in the Pau Furado State Park and its buffer zone. The Pau Furado State Park, in the Triângulo Mineiro region, has an area of 2,184.9394 ha and is located between the municipalities of Uberlândia and Araguari. A Geographic Information System (GIS) was used for zoning the risk of forest fires (ROIF) around the study area. The variables considered to prepare this risk map were land use and cover, height, slope, relief orientation, proximity to roads, precipitation and temperature. The causes of forest fires in Conservation Units have been mainly due to the incorrect use of fire by people to renew pastures and clean up crop residues on neighboring properties. Thus, the risk map validated the occurrence of fires around the park in question in the years 2019 and 2020 through satellite images, which started in proximity to roads and neighboring pasture areas. The study area presented about 64.5% referring to very high to high-risk classes, grouping an area of 14,639 hectares.*

**KEYWORDS:** Fuzzy logic. Forest fire. Conservation units. GIS**INTRODUÇÃO**

Nos anos 2000 foi criada a lei Nº 9.985 do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (BRASIL, 2000) com o propósito de estabelecer critérios e normas para a criação, implantação e gestão das unidades de conservação ambiental. Essas unidades são definidas como áreas que possuem características naturais importantes onde o ecossistema necessita de proteção e

---

<sup>1</sup> Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM), Campus Uberaba.

conservação da flora, fauna, recursos hídricos, aspectos geológicos e entre outras características

ambientais. As referidas unidades de conservação ambiental são de fundamental importância para a preservação dos ecossistemas, proporcionando pesquisas científicas, manejo e educação ambiental pela busca da conservação do meio ambiente.

De acordo com WWF-Brasil (2019), as unidades de conservação (UCs) são um importante meio de impulsionar o crescimento do país. Se inseridas nos planejamentos setoriais, são um diferencial competitivo para dinamizar as economias locais, promovendo empregos, e garantir a sustentabilidade da produção agrícola e a qualidade de vida nas cidades. Em janeiro de 2007 foi criado o Parque Estadual do Pau Furado a primeira unidade de conservação de proteção integral criada na região do Triângulo Mineiro sob administração do Instituto Estadual de Florestas (IEF). O parque tem uma área de 2.184,9394 ha localizado entre os municípios de Uberlândia e Araguari. A reserva abrange um fragmento representativo e bem conservado do bioma Cerrado, com pequenas intercorrências de Mata Atlântica, no vale do Rio Araguari. A área abriga mais de 900 espécies de fauna e flora, sendo que algumas são reconhecidas com grau de ameaça ou vulnerabilidade de extinção. Entre elas a aroeira, a onça-parda, o lobo-guará e o tamanduá-bandeira.

As unidades de conservação estão sob grande ameaça todos os anos no período da seca. A ocorrência de incêndios causa danos às florestas e traz grandes problemas para o meio ambiente, afetando a fauna, a flora e o solo. Muitos incêndios, usualmente no Brasil, se tornam incontroláveis, destacando-se o incêndio acidental em Roraima no início de 1998 que destruiu cerca de 3,3 milhões de hectares e na Floresta Nacional de Carajás, em Parauapebas, sul do Pará, com área queimada de 584 hectares com 283 focos de incêndio (Alves; Nóbrega, 2011).

No Brasil, grande parte das Unidades de Conservação (UCs) vêm sendo atingidas por incêndios florestais, estes uma das principais preocupações na gestão e manejo das UCs, principalmente as do bioma cerrado (Prudente, 2010). As causas dos incêndios florestais nas Unidades de Conservação têm sido principalmente pelo uso incorreto do fogo por pessoas, para renovação de pastagens e limpeza de restos de cultura nas propriedades vizinhas. Neste sentido, frequentemente não são realizados os aceiros, o período da realização da queima é inadequado e há desconhecimento sobre equipamentos de controle do fogo e alternativas ao uso de queimadas. Além disso, são também causas frequentes a ação de incendiários, caçadores, pescadores e soltura de balões, entre outras (Medeiros, 2002).

Segundo Batista (2004) a alternativa utilizada pela maioria dos órgãos responsáveis pela proteção dos recursos naturais é a adoção de técnicas e medidas de prevenção de incêndios florestais como conscientização da população, monitoramento dos incêndios e elaboração de mapas de risco de incêndios florestais. Assim, o mapa de risco de incêndios tem sido um instrumento viável para auxiliar o planejamento de prevenção e combate aos incêndios florestais. Um dos métodos que vem obtendo sucesso no mapeamento de risco de incêndios é a utilização de fatores inerentes à área e à vegetação local, como relevo, tipos vegetais, uso da terra, dados meteorológicos locais, além de outros (Ferraz; Vettorazi, 1998) e o uso de um índice meteorológico de previsão de incêndios (Pezzopane; Oliveira Neto; Vilela, 2001). Todos estes dados são analisados de acordo com a sua distribuição espacial na

área e, para obter melhor resultado, a análise pode ser realizada através de um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem ser utilizados para o gerenciamento, manejo e elaboração de zoneamento de risco de ocorrência de incêndios florestais (ROIF) para obtenção de mapas de risco de incêndios florestais. Esses mapas de risco, indicam áreas mais vulneráveis às ocorrências da eclosão do fogo, podendo auxiliar no planejamento, gestão da prevenção ao surgimento dos incêndios. Na região do cerrado, existe carência da elaboração desses mapas, incluindo a região do Parque Estadual do Pau Furado. Segundo o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) o parque teve grandes incêndios florestais em 2020 entre os meses de março a setembro e em 2021 entre os meses de junho a outubro, sendo em setembro/2020 um incêndio que durou 24 horas e de difícil controle por parte do corpo de bombeiros.

Dentro do ambiente SIG, a lógica fuzzy é aplicada para a integração de variáveis. Essa análise multicritério pode ser usada para agregar precisão no modelo matemático de conjuntos clássicos com a imprecisão do mundo real. A teoria clássica dos conjuntos apenas identifica se um elemento pertence a um determinado conjunto. Zadeh (1965) propôs uma caracterização mais ampla que atribui um grau de pertinência, que pode variar em uma escala de 0 (elemento não pertencente ao conjunto) a 1 (elemento totalmente pertencente ao conjunto). Portanto, a lógica fuzzy é uma forma de gerenciar incertezas pela expressão de termos com um grau de certeza em uma faixa numérica [0,1]. Assim, um vetor de relevância fuzzy também é referido como um vetor de possibilidade ou uma distribuição de possibilidade.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é a aplicação da lógica fuzzy para o mapeamento de risco de ocorrência de incêndios florestais no Parque Estadual do Pau Furado e sua zona de amortecimento.

Como objetivo específico deste trabalho é utilizar a lógica fuzzy para identificar as variáveis que tem maior influência no risco de incêndio florestal e quais classes de risco tem no Parque Estadual do Pau Furado.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Caracterização da área de estudo**

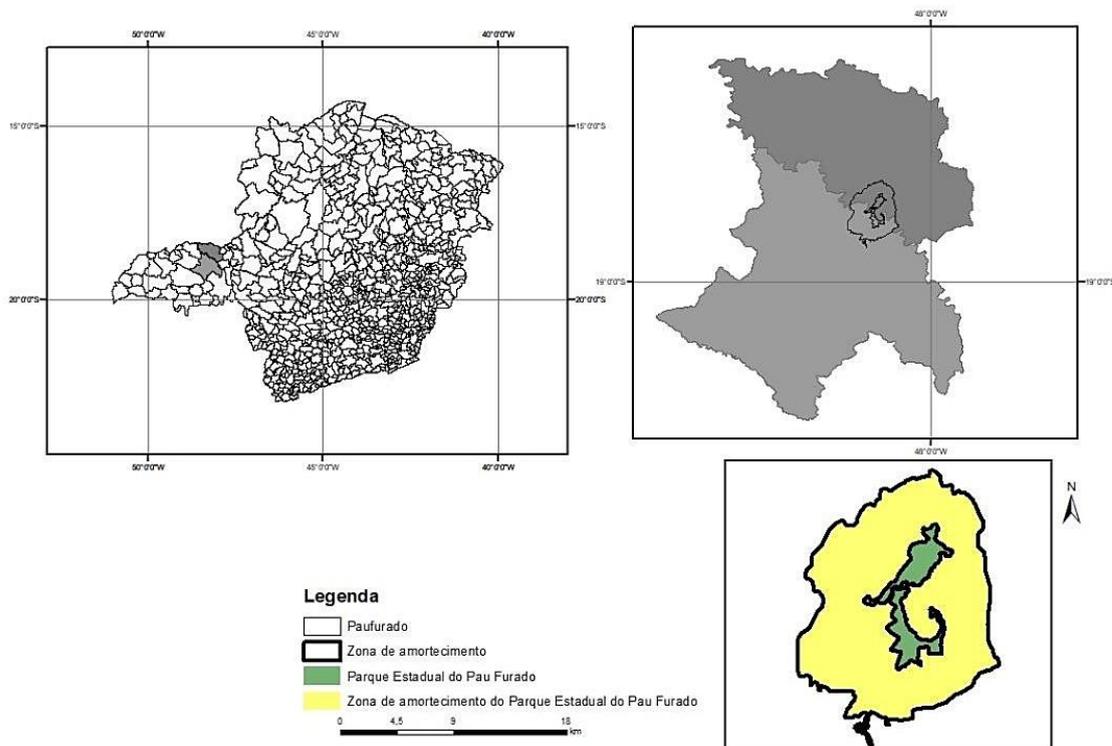
O trabalho foi realizado no Parque Estadual do Pau Furado/MG (PEPF) e sua zona de amortecimento, ambas pertencentes aos Municípios de Uberlândia/MG e Araguari/MG. A área de estudo compreende um total de 25.760 ha localizado a uma latitude 18° 49' 43" S e a uma longitude 48° 10' 03" W, estando a uma altitude de 724 metros.

O clima da região segundo a escala de Köppen-Geiger é Aw, com duas estações bem definidas, inverno seco e verão chuvoso, com temperaturas médias que variam de 20°C a 23°C, sendo os meses mais secos de abril a setembro, e os meses mais chuvosos de outubro a março (IEF, 2011).

O Parque abriga um fragmento bem conservado do bioma Cerrado, com algumas intercorrências do bioma Mata Atlântica no vale do rio Araguari (IEF, 2011), cuja composição vegetal é muito rica (Figura 1), apresentando uma forte relação entre os tipos de solo como as matas estacionais

deciduais, as matas estacionais semidecíduas, as matas ciliares, as matas de galeria, os cerrados sentido restrito e os cerradões (IEF, 2011).

Figura 1 – Localização do Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
*Figure 1 – Location of Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.*



Fonte: Os autores.

#### Base de dados

Para desenvolver o estudo foi necessário buscar a base de dados de diferentes fontes sendo elas: o uso e cobertura do solo foi usado a imagem do Google Earth Engine; altura, declividade, orientação do relevo e proximidade de estradas foi usado o banco de dados do IDE SISEMA; precipitação foi usado o banco de dados do AMBDATA e temperatura do banco de dados do IEDE-MG (Infraestrutura de Dados Espaciais de Minas Gerais).

Foi usada a lógica fuzzy que é uma técnica de inteligência artificial que se baseia tanto na teoria de conjuntos quanto nos graus de verdade, ou seja, é a metodologia que estabelece se um valor pertence ou não a um determinado conjunto, que nesse caso varia de 0 a 1, e qual o seu grau de influência sobre o resultado final. Assim, partindo do ponto que normalmente os valores utilizados como entrada em procedimentos geotecnológicos são contínuos, é preciso que o usuário estabeleça estratégias de conversão desses para um intervalo de 0 a 1. Esse processo é conhecido como fuzzificação, estabelecendo a associação fuzzy para cada valor de entrada com base em funções de pertinência. Os valores transformados variam de 0 a 1, definindo a possibilidade de pertencer a uma classe ou conjunto especificado, onde o risco é considerado “muito alto” quando os valores se

aproximam de 1 e “muito baixo” quando se aproximam de 0 (Ramalho, 2021b).

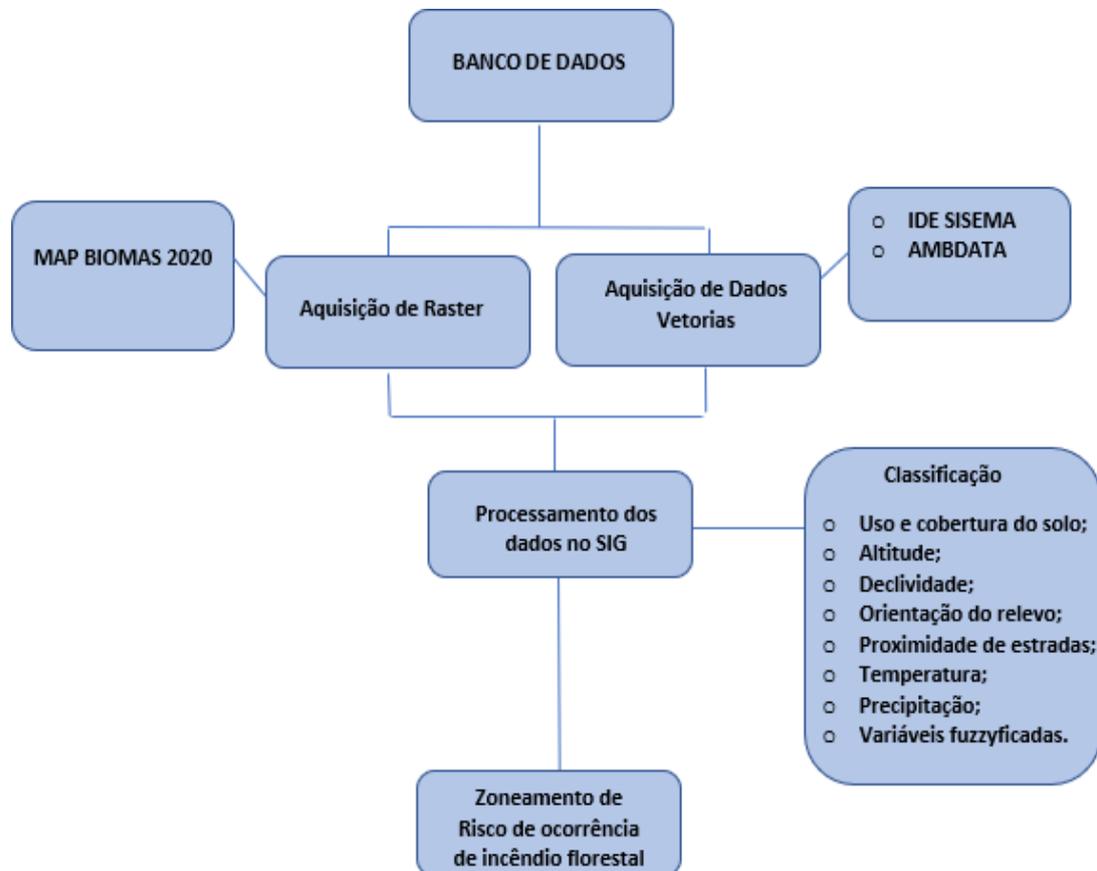
Para elaborar o ROIF, a Lógica fuzzy integrará diversas variáveis de influência para que o modelo se torne uma abstração mais fiel da realidade. Serão utilizados mapas temáticos, sendo um com as classes de material combustível, representado pelas cartas de vegetação de acordo com as recomendações de Soares (1996) e outros representando as classes de declividade, pluviosidade, altitude, proximidade de estradas, temperatura e faces de exposição solar.

Autores como Ribeiro, Soares e Bepler (2012) explicam que a variável de proximidade de rodovias deve ser incluída no modelo devido ao intenso movimento de pessoas que pode contribuir para o aumento do risco de ignição. Torres *et al.* (2017a) afirmaram que a orientação do relevo e a inclinação influenciam a propagação das chamas devido à variação na incidência solar em diferentes faces da área e a velocidade de propagação estão relacionadas à inclinação do terreno. No entanto, deve-se saber que outras variáveis têm influência significativa no comportamento do fogo, como velocidade do vento, temperatura da superfície, severidade das chamas, cobertura do solo e condições meteorológicas, entre outros.

Após a geração dos planos de informações referentes a cada um dos fatores, estes serão ordenados de acordo com seus respectivos pesos e integrados na forma de um mapa base por meio das ferramentas de overlay do software SIG. Dessa forma, cada pixel do mapa resultante representará a soma dos valores do mesmo pixel em cada plano de informação, ordenado de acordo com seu peso. Para o entendimento da distribuição espacial do risco de incêndios na paisagem, esse mapa será reclassificado em cinco classes de risco: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto (Figura 2).

Figura 2 - Fluxograma das atividades realizadas no projeto do Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.

Figure 2 – Flowchart of activities carried out in the Pau Furado State Park Project, State of Minas Gerais.



Fonte: Os autores.

Com os dados consolidados, as informações foram inseridas no SIG para o processamento dos dados ordenados de acordo com seus respectivos pesos e integrados na forma de um mapa base por meio das ferramentas de overlay do software SIG (Quadro 1).

BANCO DE DADOS UTILIZADO NA CONSTRUÇÃO DO TRABALHO

Quadro 1 - Banco de dados utilizado.

Table 1 – Database used,

Dados	Uso no estudo	Fonte	Disponível em
Mapa de uso e ocupação do solo	características dos materiais combustíveis que compõem a cobertura da terra	Google Earth Engine: Mapbiomas User toolkit	<a href="https://code.earthengine.google.com/62169792fab262802b9900c8acb0ae4f">https://code.earthengine.google.com/62169792fab262802b9900c8acb0ae4f</a>
Limite dos municípios	Localização da área de estudo	SISEMA 2020	<a href="https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis">https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis</a>
Limite da zona de amortecimento do Parque Estadual do Pau Furado	Localização da área de estudo	linktr.ee/ParqueEstadualDoPauFurado	<a href="https://drive.google.com/drive/folders/1d6RWYgkNxdE9Lu1ELf6nWGoQhmQ9jSf">https://drive.google.com/drive/folders/1d6RWYgkNxdE9Lu1ELf6nWGoQhmQ9jSf</a>
Limite do Parque estadual Pau Furado	Localização da área de estudo	linktr.ee/ParqueEstadualDoPauFurado	<a href="https://drive.google.com/drive/folders/1d6RWYgkNxdE9Lu1ELf6nWGoQhmQ9jSf">https://drive.google.com/drive/folders/1d6RWYgkNxdE9Lu1ELf6nWGoQhmQ9jSf</a>

Malha viária	Determinar a influência diretamente no risco de ocorrência de incêndios	SISEMA 2020	<a href="https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis">https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis</a>
Temperatura média anual	A temperatura tem o poder de interferir na velocidade e intensidade dos ventos, na estabilidade atmosférica, na umidade relativa do ar e consequentemente na umidade e inflamabilidade dos materiais combustíveis	Google Earth Engine	<a href="https://code.earthengine.google.com/862ef6e74f7d0ed26318c09ac98b41e1">https://code.earthengine.google.com/862ef6e74f7d0ed26318c09ac98b41e1</a>
Precipitação acumulada anual	Quanto maior a precipitação menor o risco de incêndio florestal	INPE/2022	<a href="http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/download.php#var_ind">http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/download.php#var_ind</a>
Altitude	Quanto maior a altitude menor o risco de incêndio florestal e quanto menor a altitude maior o risco de incêndio florestal	SISEMA 2020	<a href="https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis">https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis</a>
Declividade	Quanto maior a inclinação do terreno maior o risco de incêndio florestal	SISEMA 2020	<a href="https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis">https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis</a>

## Uso e ocupação do solo para o risco de incêndio

O mapa de uso e ocupação da terra, obtido no MapBiomas, ajudou na compreensão dos tipos de vegetação da área de estudo. De acordo com o autor Biazatti (2019), o risco de ocorrência de incêndios florestais está diretamente relacionado com as características dos materiais combustíveis que compõem a cobertura da terra.

A padronização dos valores de entrada de uso e ocupação da terra sobre a imagem matricial de RIF foi através da função de pertinência Fuzzy Gaussian. Esse tipo de função de pertinência tem um decaimento suave e tem valores diferentes de zero para todo domínio da variável estudada, ou seja, define uma distribuição de Gauss ou normal em torno de um ponto central indicado com um valor de inclinação da curva que pode assumir 0,01 – 1 (Equação 1), (Silva; Pontes, 2011).

$$\mu(x) = \exp^{-\sigma(x-a)^2} \quad (\text{eq. 1})$$

Em que  $\sigma$  é o parâmetro que determina a inclinação ou propagação da curva:  $x$  e o valor da classe de uso e ocupação da terra na imagem matricial e  $a$  corresponde ao valor no ponto médio que define o As estradas ou mesmo trilhas são ligações que permitem a exploração mais eficiente de uma região, logo, podem também ser fator desencadeante de alto risco de incêndios florestais e devem ser consideradas quando se realiza uma análise de zoneamento de riscos de fogo. Isso porque, embora sejam necessários, às proximidades das estradas devem ser constantemente monitoradas, pois a intensa movimentação humana nessas áreas pode aumentar o risco de iniciar o processo de ignição (Biazatti, 2019).

Para a definição da variável proximidade a estradas, em primeiro lugar foi utilizado um buffer para estabelecer uma área de influência das estradas sobre o início dos incêndios florestais. Estabeleceu-se uma escala de 25 a 150 metros como sendo a área de influência em torno das estradas, de acordo com Chuvieco e Congalton (1989) e Pew e Larsen (2001), em função da maior locomoção de veículos e pessoas. Desta maneira, as rodovias foram tidas com maior influência ao risco de incêndio sendo empregado um buffer de 100 metros e para as estradas rurais foi empregado um buffer de 50 metros.

Utilizou-se a função de pertinência Fuzzy Small (pequeno) para tratar a variável proximidade a estradas rurais e urbanas. Essa função indica que pequenos valores do raster de entrada têm alta pertinência no conjunto fuzzy. Atribui um valor de pertinência de 0,5 no ponto médio.

Ponto central para a função em que  $\mu(x)$  adquire 1.

Rede viária para o risco de incêndio

Declividade para o risco de incêndio

De acordo com estudos realizados por Soares e Batista (2007) e Ribeiro *et al.* (2008), sabe-se que a declividade exerce grande influência na orientação do fogo e também no aumento da velocidade de propagação de suas chamas.

Utilizou-se a função de pertinência Fuzzy Linear para realizar o estudo da variável declividade. A função calcula a associação com base na transformação linear do raster de entrada. Atribui um valor de associação de 0 no mínimo e uma associação de 1 no máximo.

### Altitude para o risco de incêndio

Devido à relação direta entre a temperatura e a altitude, autores como Ribeiro *et al.* (2008) e Tagliarini *et al.* (2020), afirmaram que altitudes inferiores a 600 metros (temperaturas mais altas), proporcionam maior secagem ao material combustível e conseqüentemente maior risco de ocorrência de incêndios florestais.

Já Oliveira *et al.* (2004), a elevação do terreno em relação ao nível do mar é muito importante, pois afeta as condições climáticas locais e conseqüentemente atua nas características de umidade do material combustível. Baixas elevações têm a tendência de apresentar estações de risco de incêndios mais longas que altas elevações.

Utilizou-se a função de pertinência Fuzzy Small (pequeno) para tratar a variável altitude. Essa função indica que pequenos valores do raster de entrada têm alta pertinência no conjunto fuzzy. Atribuiu-se um valor de pertinência de 0,5 no ponto médio de 570 m de altitude.

### Orientação do relevo para o risco de incêndio

A exposição de um terreno é fator essencial na probabilidade de ocorrência e propagação de um incêndio. No hemisfério Sul, os raios solares incidem mais diretamente sobre faces voltadas para o norte, transmitindo maior quantidade de calor para essa exposição do que para as outras. A face oeste é a segunda a receber maior quantidade de energia, seguida da face leste. A face sul é a que menos recebe radiação.

A orientação do relevo influencia diretamente a ocorrência e propagação dos incêndios pois atua na alternância da intensidade dos ventos e radiação solar que atinge o terreno.

Utilizou-se a função de pertinência Fuzzy Generalized Bell para realizar a modelagem da variável orientação do relevo. Essa função tem como base uma distribuição em forma de sino em torno de um ponto central, indicado com um valor de propagação na função e um valor para controlar a amplitude no ponto central. O valor definido no ponto central do conjunto assume um grau de pertinência de valor 1.

Os valores que se localizam entre os dois limites estão na zona de transição do conjunto e assumem graus de pertinência de mesmo valor (Equação 2).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-f}{2h}\right)^2} \quad (\text{eq. 2})$$

Em que:  $x$  é o valor da orientação do relevo ( $^{\circ}$ ) na imagem matricial;  $g$  é o parâmetro que modela a propagação da curva  $f$  corresponde ao valor no ponto médio, que indica o ponto central para a função em que  $\mu(x)$  iguala a 1 e  $h$  amplitude no ponto central.

### **Temperatura para o risco de incêndio**

De acordo com Ramalho *et al.* (2021b) a temperatura do ar é uma variável que influencia, tanto de forma direta quanto indireta, na ocorrência de incêndios florestais. Isso ocorre porque a temperatura tem o poder de interferir na velocidade e intensidade dos ventos, na estabilidade atmosférica, na umidade relativa do ar e conseqüentemente na umidade e inflamabilidade dos materiais combustíveis. Desta forma, é correto afirmar que temperaturas elevadas potencializam o risco de incêndios florestais e temperaturas mais amenas reduzem o risco.

Utilizou-se a função de pertinência Fuzzy Linear para realizar o estudo da variável temperatura. A função calcula a associação com base na transformação linear do raster de entrada. Atribui um valor de associação de 0 no mínimo e uma associação de 1 no máximo.

### **Precipitação para o risco de incêndio**

De acordo com Ramalho *et al.* (2021b) a precipitação, por sua vez, afeta o potencial de ignição das chamas devido à sua influência sobre a umidade do material combustível. Ou seja, períodos mais secos elevam a probabilidade de ocorrência de incêndios florestais.

Utilizou-se a função de pertinência Fuzzy Linear para realizar o estudo da variável precipitação. A função calcula a associação com base na transformação linear do raster de entrada. Atribui um valor de associação de 0 no mínimo e uma associação de 1 no máximo.

## **RESULTADO E DISCUSSÕES**

Com o estudo desenvolvido foi possível identificar através dos mapas temáticos para cada variável qual o nível de risco de incêndio da zona de amortecimento do Parque Estadual do Pau Furado.

### **Mapa do uso e ocupação do solo para o risco de incêndio**

O uso e ocupação do solo, auxiliou o entendimento dos padrões de organização da zona de amortecimento do Parque Estadual do Pau Furado assim identificando as classes de uso e ocupação da terra. Analisando o mapa de uso e ocupação do solo é possível observar que existem 14 tipos diferentes de cobertura vegetal na área, conforme o quadro 2. Porém existe a predominância da classe de cobertura vegetal pastagem e Mosaico de agricultura com pastagem na área.

Quadro 2 - Classe de uso e ocupação da terra reclassificada em função do potencial parao risco de incêndios florestais.

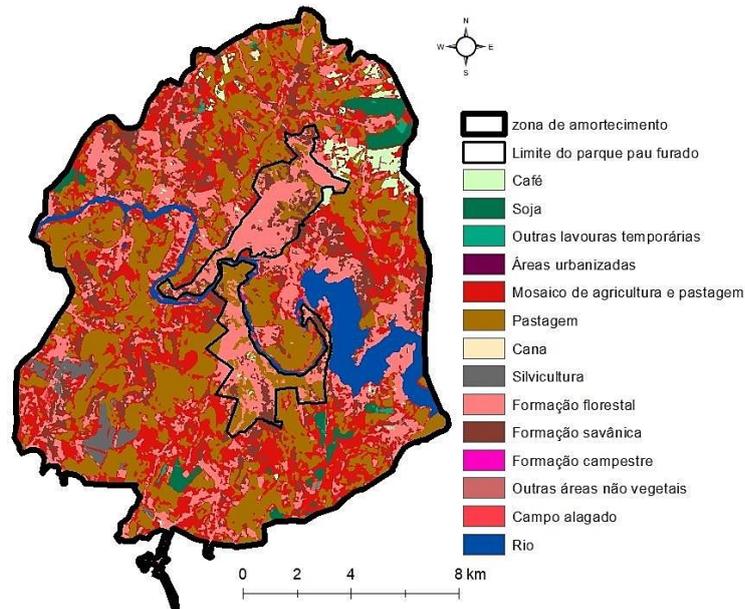
Table 2 – Class of land use and occupation reclassified according to the potential for risk of forest fires.

Classes de uso e ocupação da terra	Valor reclassificado
Café	1
Soja	2
Outras lavouras temporárias	3
Áreas urbanizadas	4
Mosaico de agricultura e pastagem	5
Pastagem	6
Cana	7
Silvicultura	8
Formação Florestal	9
Formação Savânica	10
Formação Campestre	11
Outras áreas não vegetais	12
Campo Alagado	13
Rio	14

Fonte: Adaptado de Ramalho *et al.* (2021b).

Os pesos concedidos às classes de uso e ocupação da terra foram estabelecidos com base na função de pertinência Fuzzy Gaussian no potencial de risco de incêndios (Figura 3).

Figura 3 - Uso e ocupação do solo no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
 Figure 3 – Land use and occupation in the Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.

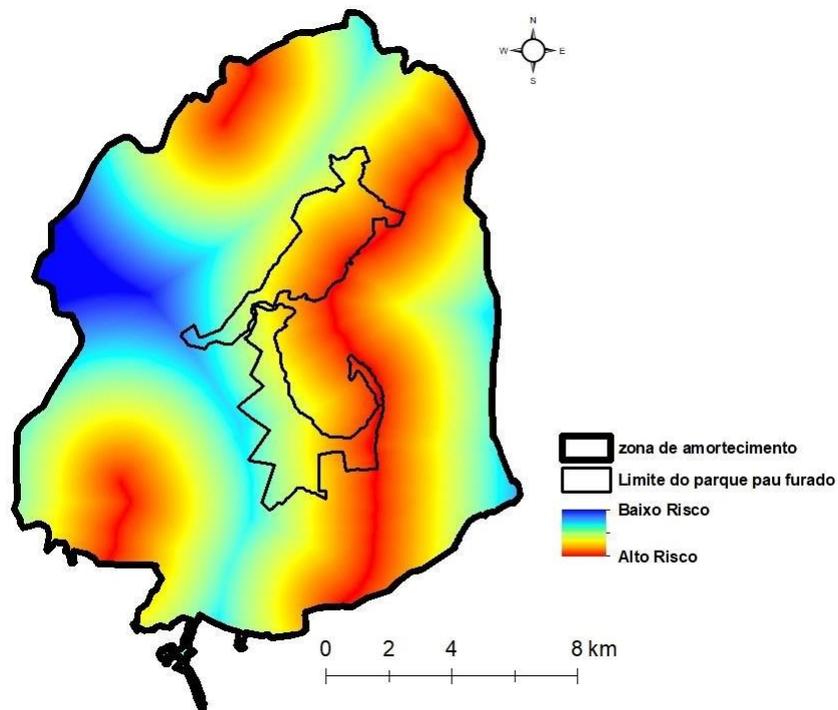


Fonte:Elaboração própria.

#### Mapa da rede viária para o risco de incêndio

A área de estudo tem influência de estradas municipais (rodovia municipal 030) sendo classificadas como primárias e secundárias de acordo com o quadro 3, a estrada primária atravessa a área na região leste da zona de amortecimento e as outras duas secundárias pegam uma pequena parte da área. As estradas presentes em todo o território representaram risco de incêndio devido a locomoção de diversos veículos e pessoas (Figura 4).

Figura 4 - Rede viária no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
*Figura 4 – Road network in Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.*



Fonte:Elaboração própria.

Quadro 3 - Classes de estradas.  
*Tabel 3 – Road Classes.*

Classe de estradas	Descrição
Primária	Estradas de maior extensão, que cruzampraticamente toda a Flora e sua Zona deAmortecimento
Secundária	Estradas de menor extensão para acesso àspropriedades

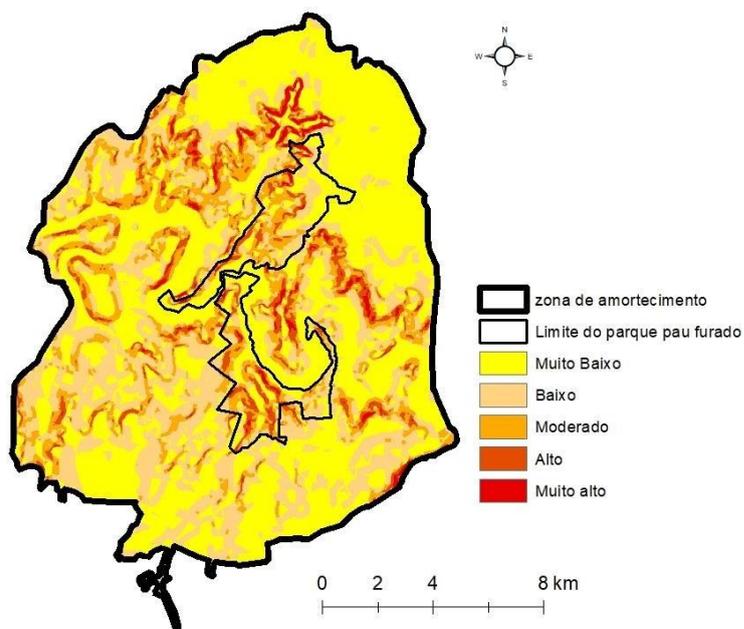
Fonte: Adaptado de Ramalho *et al.* (2021b).

### Mapa da declividade para o risco de incêndio

De acordo com o mapa existe uma diferença de nível de 366 m na área, foi classificada com cinco níveis de risco de incêndio florestal sendo eles: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto conforme demonstrado no quadro 4. De acordo com o mapa a maior porcentagem é de risco muito baixo e baixo sendo 50 % e 29% respectivamente.

A declividade exerce grande influência na orientação do fogo e também no aumento da velocidade de propagação das chamas durante um incêndio (Figura 5).

Figura 5. Declividade no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
 Figure 5 – Slope in Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.



Fonte: Elaboração própria.

Quadro 4. Risco de incêndios florestais de acordo com a declividade.  
 Table 4 – Risk of forest fires according to slope.

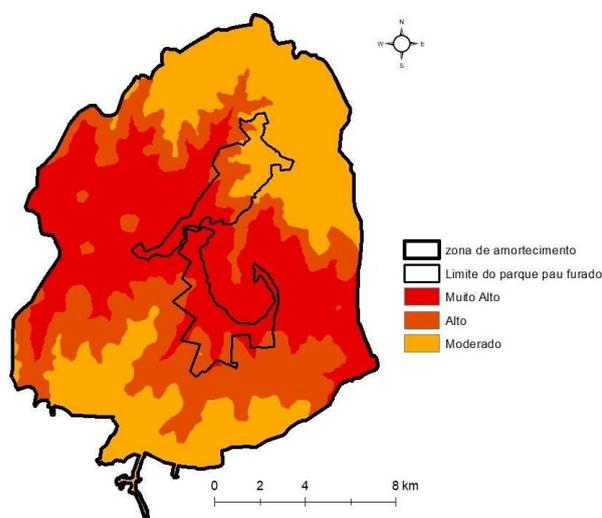
Classes de declividade	Classe de risco
< 2°	Muito baixo
2 - 6 °	Baixo
6-10°	Moderado
10- 16 °	Alto
16 - 34°	Muito Alto

Fonte: Adaptado de Ramalho *et al.* (2021b).

**Mapa da altitude para o risco de incêndio**

A variação da altitude representa uma variável ambiental que influencia o risco de incêndio devido a sua relação com a umidade relativa do ar. Quanto maior a altitude menor a temperatura, e consequentemente maior umidade relativa e indiretamente influenciando a umidade do material combustível. As faixas de risco por altitude foram elaboradas seguindo as informações fornecidas por Ribeiro. (2008). De acordo com o autor, áreas com altitude inferior a 600 metros são consideradas áreas de risco crítico de incêndios florestais. Na área de estudo a altitude de alto risco é de 570 metros de altitude conforme o quadro 5 e Figura 6.

Figura 6 - Altitude no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
*Figure 6 – Altitude in Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.*



Fonte: Elaboração própria.

Quadro 5 - Risco de incêndios florestais de acordo com a altitude.  
*Table 5 – Risk of forest fires according to altitude.*

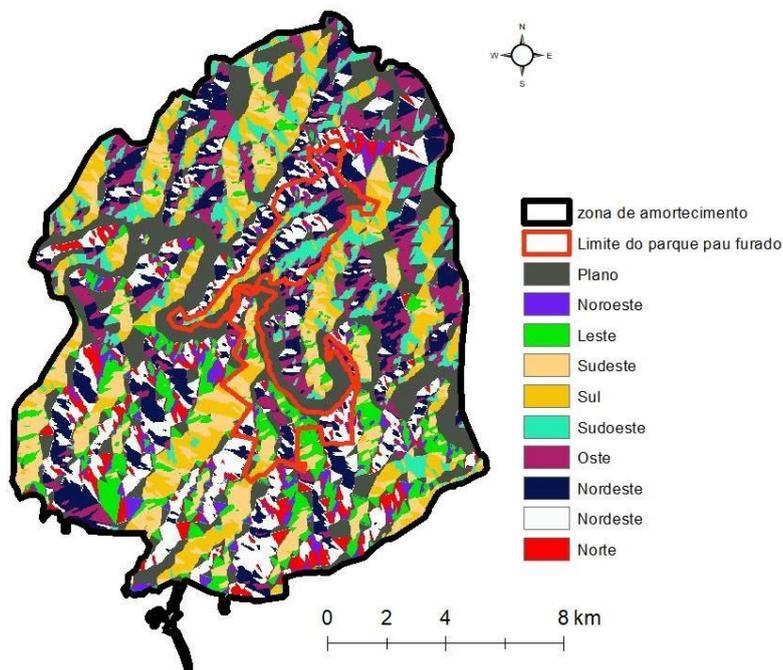
Classes de elevação (m)	Classe de risco
570 - 690	Muito alto
690 - 803	Alto
803 - 936	Moderado

Fonte: Adaptado de Ramalho *et al.* (2021b).

**Mapa da orientação do relevo para o risco de incêndio**

As temperaturas mais elevadas ao norte são justificadas pela maior exposição de radiação e pela menor umidade relativa, sendo que o material combustível seca mais rapidamente e, por essa razão, o risco de ocorrência e propagação de incêndios florestais nesta exposição é maior que nas demais. No mapa é possível verificar uma maior porcentagem da orientação do relevo classificada como fase nordeste, sendo de 24% da área total (Figura 7). No quadro 6 são demonstradas todas as orientações de relevo presente na área.

Figura 7- Orientação do relevo no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
 Figure 7 – Relief orientation in Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.



Fonte:Elaboração própria.

Quadro 6 - Risco de incêndios florestais de acordo com a orientação do relevo.  
 Table 6 – Risk of forest fires according to the relief orientation.

Orientação do relevo	Face	Classe de risco
-1°	Plano	Muito baixo
0 - 22,5°	Norte	Muito alto
22,5 - 67,5°	Nordeste	Alto
67,5 - 112,5 °	Leste	Moderado
112,5 - 157,5°	Sudeste	Baixo
157,5 - 202,5°	Sul	Baixo
202,5 - 247,5°	Sudeste	Baixo
247,5 - 292,5°	Oeste	Moderado
292,5 - 337,5°	Noroeste	Alto
337,5 - 360°	Norte	Muito alto

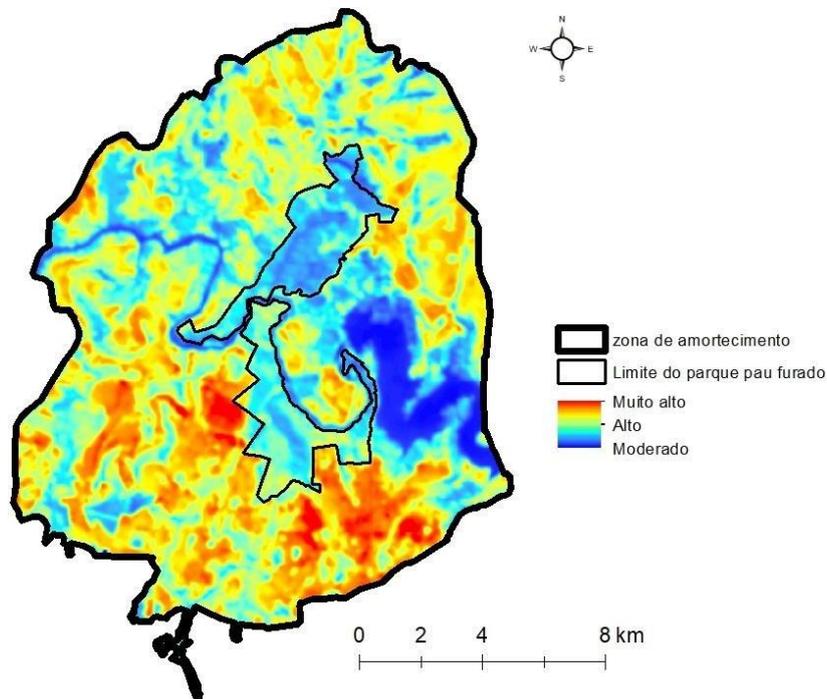
Fonte: Adaptado de Ramalho et al. (2021b).

### Mapa da temperatura para o risco de incêndio

A temperatura do ar influencia, tanto direta quanto indiretamente, a iniciação e a propagação do fogo. A temperatura age sobre outros fatores que atuam na propagação do fogo, indiretamente, como os ventos e a estabilidade atmosférica, além de manter os combustíveis com umidade menor. Para que ocorra a combustão que inicia o fogo, o combustível tem de alcançar temperatura elevada. A temperatura ambiente influencia, diretamente, na temperatura do combustível (Figura 8). A temperatura média anual na área de estudo tem uma amplitude térmica de 10,1 °C. O quadro 7 mostra as temperaturas e suas classes de risco.

Figura 8 - Temperatura no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.

Figure 8 – Temperature in Pau Furado Satet Park, State og Minas Gerais.



Fonte: Elaboração própria.

Quadro 7 - Influência da temperatura do ar sobre o risco de incêndios florestais.

Table 7 – Influence of air temperature on the risk of forest fires.

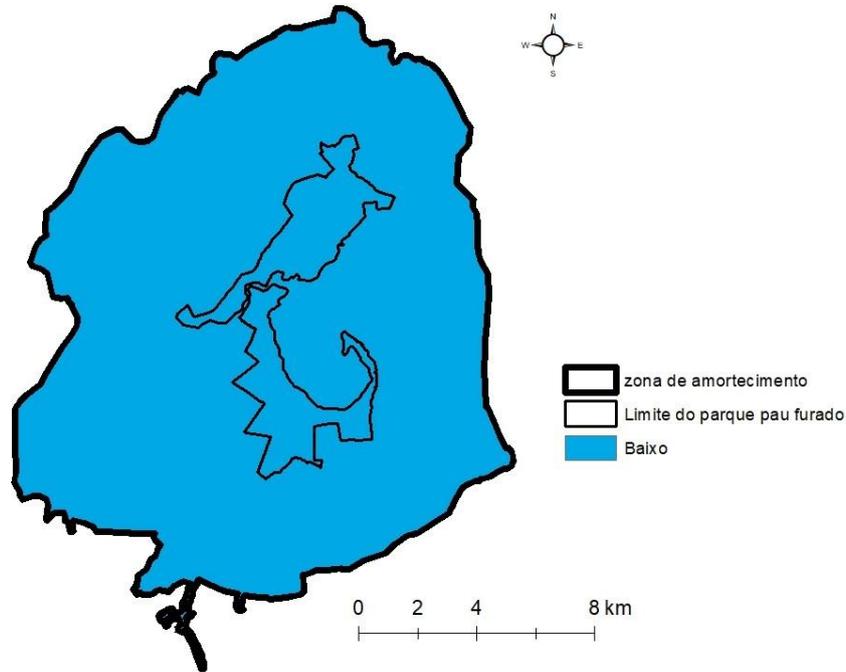
Temperatura do ar	Classe de risco
20,4 - 24, 6	Moderado
24,6 - 27	Alto
27 - 31	Muito alto

Fonte: Adaptado de Ramalho *et al.* (2021b).

### Mapa da precipitação para o risco de incêndio

A variável precipitação é de grande importância para analisar o risco de incêndio, tendo em vista que eleva a quantidade de umidade no solo e nos materiais combustíveis, dificultando ou até mesmo impossibilitando o início e a propagação das chamas. Na área de estudo a precipitação média anual é alta variando de 1370 mm - 1559 mm (Figura 9) . O quadro 8 mostra a influência da precipitação no risco de incêndio.

Figura 9. Precipitação no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
*Figure 9 – Precipitation in Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.*



Fonte: Elaboração própria.

Quadro 8 - Influência da precipitação média anual sobre o risco de incêndios florestais.  
*Table 8 – Influence of average annual precipitation on the risk of forest fires.*

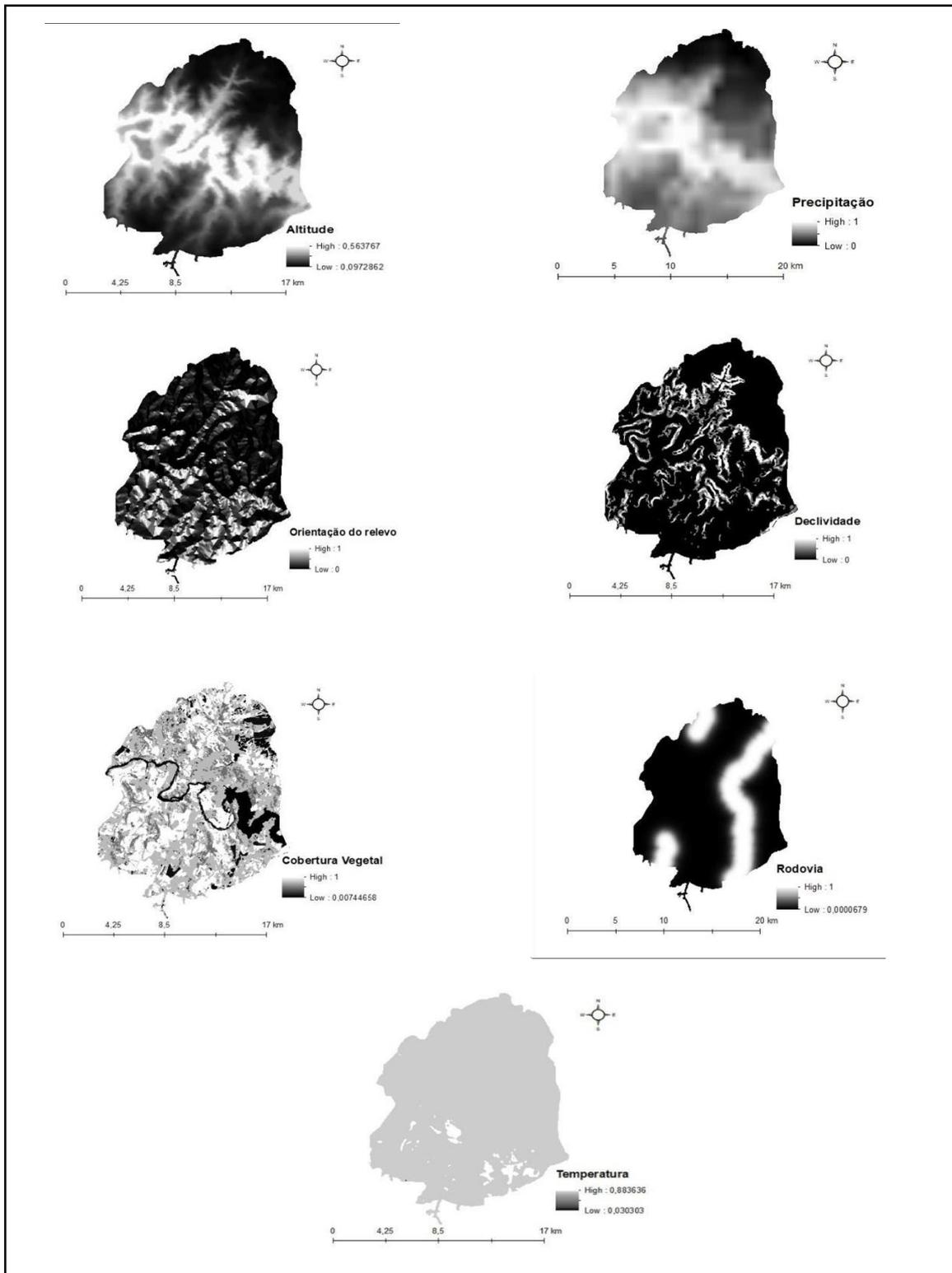
Precipitação (mm)	Classe de risco
1370 - 1560	Baixo

Fonte: Adaptado de Ramalho et al. (2021a).

### Variáveis fuzzificadas

Foi feita a fuzzificação de cada variável para determinar o peso de cada variável no risco de incêndio florestal. Quanto mais próximo do valor um e com a cor mais clara maior o risco de incêndio florestal que a variável apresenta (Figura 10).

Figura 10. Variáveis *fuzzificadas* do Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
 Figure 10 – *Fuzzified variables from Pau Furado Satet Park, Satet of Minas Gerais.*



## DISCUSSÃO

A zona de amortecimento do Parque Estadual do Pau Furado possui características no uso e ocupação de seu território que exercem influência direta seja no início, propagação e/ou intensidade dos incêndios florestais. De acordo com Pereira Júnior (2002), os elementos que possuem maior ligação com os incêndios são as condições climáticas, a topografia e o tipo de cobertura vegetal da região. Além desses elementos citados anteriormente, Soares (2007) leva em consideração a umidade do material combustível e tipos de floresta.

As diferentes orientações do relevo recebem quantidades diferenciadas de radiação solar quando comparadas com uma área com superfície plana que está em um mesmo local e época do ano (Torres; Machado, 2008). Quanto mais plano, maior o potencial acúmulo de água na superfície do solo, dificultando o início e propagação dos incêndios florestais.

A declividade do relevo também tem efeito direto ao risco de incêndio pois ela tem forte influência sobre o clima da região, atua na vegetação predominante e por fim no material combustível presente na área, propagando de forma mais rápida o fogo nos aclives e mais lentamente nos declives (Oliveira, 2002; Ribeiro, 2008).

As estradas e trilhas podem ser consideradas como rotas potenciais para o acesso de pessoas, portanto vistas como aspecto preponderante ao risco de incêndio pelos fatores: incêndios criminosos, cultos religiosos praticados no local, incêndios causados por cigarros, pequenas fogueiras construídas na área (Ferraz; Vettorazzi, 1998; Prudente, 2010). Na zona de amortecimento passa estradas municipais uma delas atravessa o parque o que aumenta mais o risco de incêndio florestal. Também existem trilhas que são abertas ao público.

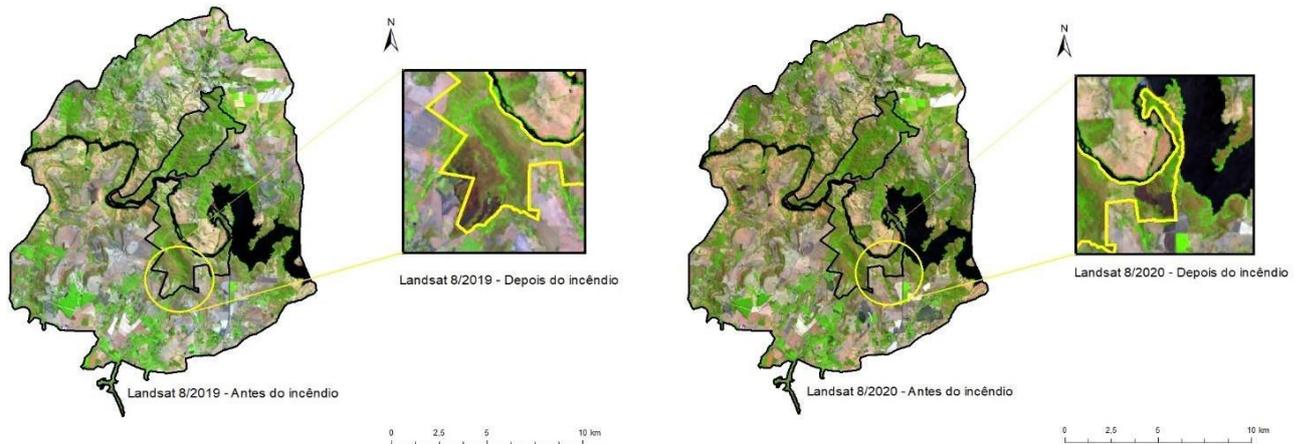
Com todas as variáveis foi possível elaborar o ROIF e nele contém as cinco classes de risco de incêndio florestal, sendo muito baixa, baixa, moderado, alto e muito alto. Na área de estudo foi constatado que 49,8% da área está na classificação muito alta.

A área de estudo já enfrentou diversos incêndios florestais, entre eles estão um em 2019 e outro em 2020. Em setembro, de acordo com site G1 (2019), área atingida pelo fogo foi de aproximadamente 40 hectares. Em setembro/2020 mais de 70 hectares do Parque Estadual do Pau Furado em Uberlândia foram atingidos por um incêndio que durou quatro dias. O incêndio começou na sexta-feira às margens da rodovia municipal 030, conhecida como estrada do Pau Furado, próximo à trilha do leite, que fica fora da área do parque, e se alastrou para a área de preservação.

Os danos dos incêndios podem ser vistos nas imagens do satélite Landsat 8, mostrando antes e depois do incêndio florestal, em 2019 e 2020.

Figura 11. Imagens do satélite Landsat 8 em 2019 e 2020 no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.

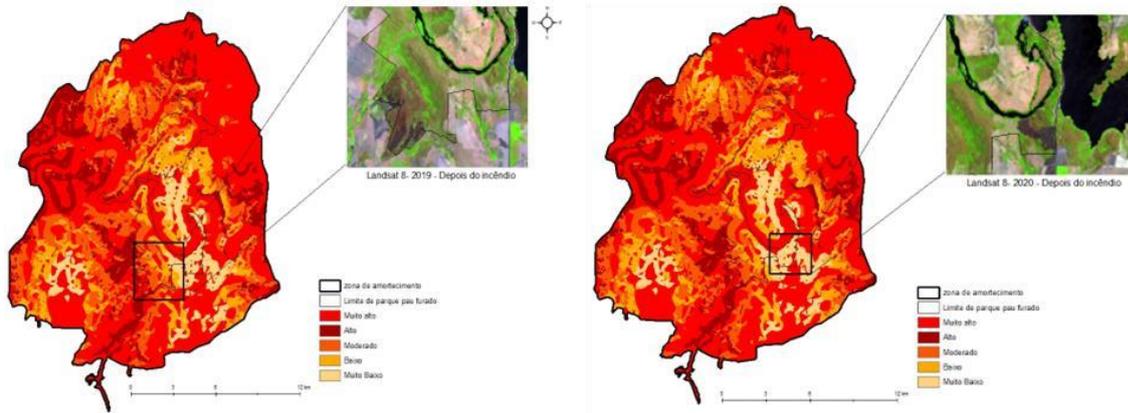
Figure 11 – Images from the Landsat 8 satellite in 2019 and 2020 in Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.



Fonte: Elaboração própria.

No mapa ROIF gerado é observado as cinco classes de risco de incêndio no local onde ocorreram os incêndios. Assim é possível confirmar que nas áreas com maior risco de incêndio realmente houveram incêndios na área de estudo conforme mostrado na figura 11. Dessa forma, foi possível comprovar com uma verdade de campo (as imagens de satélite antes e depois das ocorrências) que as áreas com maior risco de incêndios florestais têm grande chance de vir a ser um foco mesmo de incêndio.

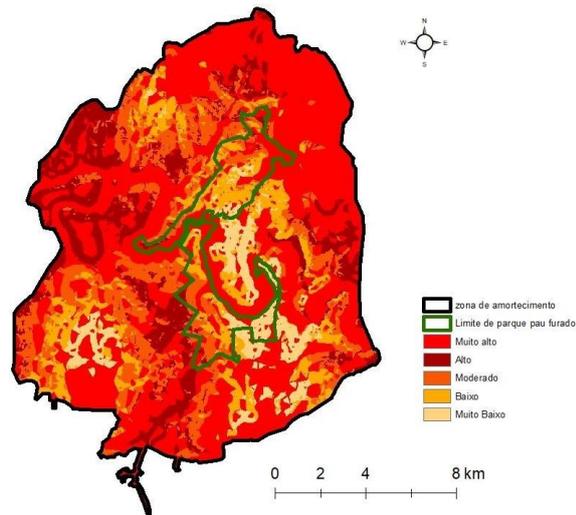
Figura 12. Risco e imagens do satélite Landsat 8 em 2019 e 2020 no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
 Figure 12 – Risk and imagens from the Landsat 8 satellite in 2019 and 2020 in Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.



Fonte: Elaboração própria.

Resultado final da classe de risco de incêndio florestal com suas respectivas distribuições de área é mostrado na Figura 12.

Figura 13. ROIF no Parque Estadual do Pau Furado, Estado de Minas Gerais.  
 Figure 13 – ROIF in Pau Furado State Park, State of Minas Gerais.



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a Figura 13, visualizam-se áreas com maior risco perto dos limites do parque mais ao sul, no quadro 9 mostra que 49,8% da área têm risco muito alto de incêndio conforme comprovado com a verdade de campo na figura 12.

Quadro 9. Porcentagem da área e o grau de risco de incêndio florestal.

*Table 9 – Percentage of area and degree of forest fire risk.*

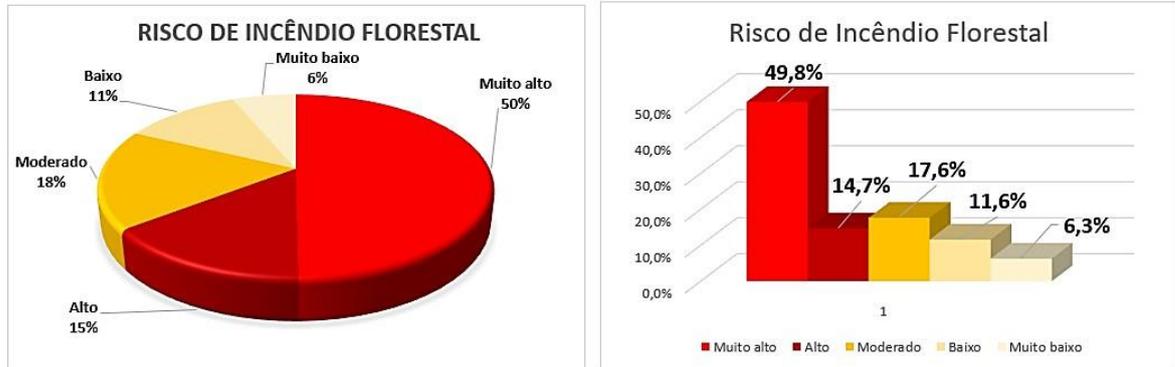
Percentual da área - %	Classe de risco
49,8	Muito alto
14,7	Alto
17,6	Moderado
11,6	Baixo
6,3	Muito Baixo

Fonte: Os autores.

De acordo com Tetto *et al.* (2012) encontrou na sua área de estudo na Floresta Nacional de Irati/PR que 43,16% da área tem risco baixo de incêndio florestal. Já Ribeiro *et al.* (2012) encontrou no mapeamento do risco de incêndios florestais no município de Novo Mundo/MT que 95% da encontravam-se sob risco alto e muito alto de incêndio florestal.

A Figura 14 ilustra os percentuais da área representando as classes de risco de incêndios florestais. Cerca de 64,5% são referentes às classes de risco muito elevado a elevado, agrupando uma área de 14.639 hectares. Isso é importante salientar, pois representa a maior área do entorno do parque, mostrando aos gestores do parque que essa área causa pressão na ocorrência de incêndios e que medidas devem ser focadas nessas áreas para evitar tais ocorrências nas épocas secas do ano.

Figura 14 - Área do Parque Estadual do Pau Furado e suas respectivas áreas percentuais dentro de cada classe de risco de incêndios florestais, Estado de Minas Gerais  
*Figure 14 – Area of the Pau Furado State and their respective percentage areas within each forest fire risk class, Satet of Minas Gerais.*



Fonte: Os autores.

## CONCLUSÕES

A utilização da metodologia fuzzy foi adequada para avaliar a influência das diferentes variáveis sobre o mapeamento do risco de incêndio florestal na área de estudo. A cobertura vegetal do solo e a temperatura foram as variáveis que tiveram uma maior favorabilidade à ocorrência de incêndios

## REFERÊNCIAS

- ALVES, K. M. A.; NÓBREGA, R. S. Uso De Dados Climáticos Para Análise Espacial De Risco De Incêndio Florestal. Mercator, Fortaleza, v. 10, n. 22, p. 209- 219, mai./ago.2011.
- BATISTA, A. C. Mapas de risco: uma alternativa para planejamento de controle de incêndios florestais. Floresta, v.1/2, n. 30, p. 45-54, 2004.
- BIAZATTI, L. D. Zoneamento de risco de ocorrência de incêndios florestais na Floresta Nacional do Rio Preto e sua Zona de Amortecimento. Jerônimo Monteiro, 2019. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro, 2019.
- BRASIL. Lei Federal nº 9.985, de 18 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 União, Brasília, DF, 19 jul. 2000. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm)>. Acesso em: 10 de outubro de 2021.
- CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. Application of remote sensing and geographic information systems to fire hazard mapping. Remote Sensing of Environment, v. 29, p.147-159, 1989.
- EUGENIO, F. C.; SANTOS, A. R. dos; FIEDLER, N. C.; RIBEIRO, G. A.; SILVA, A.G. da; SANTOS, A. B. dos; PANETO, G. G.; SCHETTINO, V. R. Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. Journal of Environmental Management, Heverlee, v. 173, p. 65–71, 2016.

FERRAZ, S.; VETTORAZZI, C. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informação geográfica (SIG). Scientia Forestalis, São Paulo, v. 53, p. 39-48, 1998.

G1 - Incêndio atinge área de preservação ambiental do Parque Estadual do Pau Furado em Uberlândia. G1, Uberlândia, 18 de set. 2019. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2019/09/18/incendio-atinge-area-de-preservacao-ambiental-do-parque-estadual-do-pau-furado-em-uberlandia.ghtml>>. Acesso em 20 de maio de 2022.

G1 - Parque Estadual do Pau Furado será reaberto para visitação a partir de domingo em Uberlândia. G1, Uberlândia, 29 de out. 2021. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2021/10/29/parque-estadual-do-pau-furado-sera-reaberto-para-visitacao-a-partir-de-domingo-em-uberlandia.ghtml>>. Acesso em: 01 de novembro de 2021.

IEF- INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS DE MINAS GERAIS. Plano de manejo do Parque Estadual do Pau Furado. 2011. Disponível em:<<https://drive.google.com/file/d/1A0YEUiNz4GWRuAKMAe7ozYKC5RSBUmTk/view>>. Acesso em: 17 de novembro de 2021.

MEDEIROS, M. B. Efeitos do fogo nos padrões de rebrotamento em plantas lenhosas, em campo sujo. Brasília, 2002.120f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília. Brasília, 2002.

OLIVEIRA, D. dos S. Zoneamento de risco de incêndios em povoamentos florestais no norte de Santa Catarina. Curitiba, 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

OLIVEIRA, D. S.; BATISTA, A.C.; SOARES, R.V.; GRODZKI, L.; VOSGERAU, J. Zoneamento de risco de incêndios florestais para o estado do paraná. Floresta, Curitiba,v. 2, n. 34, p. 217-221, mai/ago. 2004.

PELUZIO, T. M. DE O. Lógica Fuzzy na determina o de fragmentos florestais paracoleta de sementes. Jer nimo Monteiro, 2017. 151f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo. Jer nimo Monteiro, 2017.

PEREIRA JÚNIOR, A. C. Métodos de geoprocessamento na avalia o da susceptibilidade do cerrado ao fogo. São Carlos, 2002. 112 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

PEW, K. L.; LARSEN, C. P. S. GIS analysis of spatial and temporal patterns of human-caused wildfires in the temperate rain forest of Vancouver Island, Canada. ForestEcology and Management, v. 140, p. 1-18, 2001.

PEZZOPANE, J. E. M; NETO, S. N. O; VILELA, M. F. Risco de incêndios em fun o da característica do clima, relevo e cobertura do solo. Floresta e Ambiente, v.8, p.161- 166, 2001.

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

RAMALHO, A. H. C.; SILVA, E. F. da; SILVA, J. P. M.; FIEDLER, N. C.; MAFFIOLETTI, F. D.; BIAZATTI, L. D.; MOREIRA, T. R.; JUVANHOL, R. S.; SANTOS, A. R. dos. Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. Journal of Environmental Management,

v. 296, p. 113122, 2021a.

RAMALHO, C. H. A, *et al.* Zoneamento de risco de ocorrência de incêndios florestais- passo a passo – ArcGIS 10.3. 1ª ed. Jerônimo Monteiro: Antônio Ramalho, 2021b.

RIBEIRO, L. Zoneamento De Riscos De Incêndios Florestais Para a Fazenda Experimental Do Canguiri, Pinhais (Pr). Floresta, v. 38, n. 3, p. 561–572, 2008.

RIBEIRO, L.; SOARES, R. V.; BEPLLER, M. Mapeamento do risco de incêndios florestais no município de Novo Mundo, Mato Grosso, Brasil. Cerne, Lavras, v. 18, n. 1, p. 117–126, 2012.

SILVA, I. D. B.; PONTES JR, A. C. F. Elaboração de um Fator de Risco de Incêndios Florestais utilizando Lógica Fuzzy. Revista Biomatemática, v. 21, p. 113-128, 2011.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. Controle e Modelagem Fuzzy. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2007.

SOARES, R. V. Planos de proteção contra incêndios florestais. In: IV REUNIÃO TÉCNICA CONJUNTA FUPEF/SIF/IPEF E II CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM CONTROLE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 1996, Piracicaba. Anais, Piracicaba: IPEF, 1996. p. 140-150.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Incêndios florestais – Controle, Efeitos e Uso do Fogo. Curitiba: FUPEF, 2007.

TAGLIARINI, F. de S. N.; BARROS, A. C.; LIMA, A. A.; RODRIGUES, B.T.; RODRIGUES, M.T.; PENACHIO, S.M. Zoneamento do risco de incêndios florestais em bacia hidrográfica. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 5, p. 28779–28790, 2020.

TETTO, F. A. BATISTA, C. A.; SOARES, V. R. Zoneamento de risco de incêndios florestais para a Floresta Nacional de Irati, Estado do Paraná, Brasil. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 40, n. 94, p. 259-265, jun. 2012.

TORRES, F. T. P.; ROQUE, B. P. M.; LIMA, S. G.; MARTINS, V. S; FARIA, A.L.L. Mapeamento do Risco de Incêndios Florestais Utilizando Técnicas de Geoprocessamento. Floresta Ambiente, Seropédica, v. 24, p.1-10, 2017a.

TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. O. Introdução à Climatologia. Ubá: Geographica, 2008.

TORRES, F. T. P.; RIBEIRO, G. A.; MARTINS, S. V.; LIMA, G. S. Mapeamento do risco de incêndios florestais utilizando técnicas de geoprocessamento. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 24, p. 25615. 2017b.

WHITE, L. A. S.; WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. Modelagem espacial do risco de incêndio florestal para o Município de Inhambupe, BA. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 36, n. 85, p. 41– 49, 2016.

WWF-Brasil. Unidades de Conservação no Brasil. 2019. Disponível em:

<[https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/factsheet\\_uc\\_tema03\\_v2.pdf](https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/factsheet_uc_tema03_v2.pdf)>.

Acesso em:

01 de novembro de 2021.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. Information and Control, v.8, p.338-353, 1965.