

A relação entre condições meteorológicas instantâneas e a ocorrência de incêndios de diferentes intensidades, na região do Parque Estadual do Pau Furado, em Minas Gerais - Brasil

The relationship between instantaneous weather conditions and the occurrence of fires of different intensities in the Pau Furado State Park region, in Minas Gerais - Brazil

Guilherme Souza de Aquino, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil,
guilherme_s.a@hotmail.com.br

ID <https://orcid.org/0009-0009-2488-7914>

José Manuel Fernandes Rocha, Centro de Estudos de Comunicação e Sociedade (CECS),
Universidade do Minho, Portugal, jmanuelrocha@sapo.pt

ID <https://orcid.org/0000-0002-6968-5875>

Vítor Pagadigoria Zucchi, Corpo de Bombeiros Militar do Paraná, Brasil, vitor_zucchi@hotmail.com

ID

Sílvio Carlos Rodrigues, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, silgel@ufu.br

ID <https://orcid.org/0000-0002-5376-1773>

João Vitor M. Bravo, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, jvmbravo@ufu.br

ID <https://orcid.org/0000-0002-5457-3192>

...

Resumo: Cada vez mais frequentes em Unidades de Conservação (UC) brasileiras, os incêndios florestais têm ocupado posição de destaque enquanto um tema preocupante à gestão ambiental do território. Nesse sentido, as pesquisas nessa temática buscam não somente a observação da própria dinâmica do fogo, mas também compreender como a intensidade e a magnitude dos incêndios são afetadas pelas condicionantes climáticas e o quanto a ação antrópica tem deflagrado esse tipo de evento, sobretudo, danoso à biodiversidade. Dessa maneira, aqui investigamos incêndios florestais de diferentes intensidades ocorridos no Parque Estadual do Pau Furado (PEPF) e suas relações com as condições meteorológicas momentâneas. O PEPF é uma importante Unidade de Conservação situada no Cerrado, próximo à cidade de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, que está circundado por propriedades rurais particulares com intenso manejo. Para este estudo, as variáveis climatológicas elencadas para análise foram: umidade relativa do ar, temperatura, direção do vento e radiação solar. Os dados climatológicos foram obtidos da estação meteorológica de Uberlândia, para o período compreendido entre os anos de 2018-2020, dentro do intervalo dos meses de estiagem (maio-setembro). As imagens foram adquiridas através do sensor Multispectral Instrument (MSI), instalado no satélite Sentinel-2. Para o mapeamento e a classificação da intensidade dos incêndios, utilizamos os índices espectrais NBR (Normalized Burn Ratio) e sua variante, o dNBR. Aqui detectamos que os incêndios de "Alta Severidade" estão relacionados com condições ambientais caracterizadas por temperaturas médias superiores a 30°C e umidades relativas do ar abaixo de 40%. Entretanto, entendemos que é na combinação do mapeamento de múltiplos fatores – para além dos climatológicos – que reside a chave para se evitar incêndios severos. A observação de variáveis climatológicas isoladas não permite que se tenha uma leitura precisa do cenário favorável à ocorrência de incêndios mais (ou menos) severos.

Palavras-chave: NBR; Variáveis climatológicas; Incêndios florestais; Gestão ambiental.

Abstract: Forest fires have increasingly become an issue of concern for the Brazilian territory's environmental management, primarily because they have been affecting Conservation Units. In this sense, research on this subject seeks not only to observe the dynamics of fire itself but also to understand how the intensity and magnitude of fires are affected by climatic conditions and the extent to which anthropogenic action has triggered this type of event, which is especially damaging to biodiversity. In this way, we are investigating forest fires of different intensities in the Pau Furado State Park (PEPF) and their relationship with the meteorological conditions at the time. PEPF is a vital Conservation Unit located in the Cerrado, near Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, surrounded by private rural properties with intense management. For this study, we selected the following climatological variables: relative humidity, temperature, wind direction, and solar radiation. The climatological data were obtained from the meteorological station of Uberlândia for the period from 2018 to 2020, within the range of the dry months (May - September). The images were acquired using the Multispectral Instrument (MSI) sensor installed on the Sentinel-2 satellite. Our study, which involved mapping and classifying the intensity of the fires, revealed a strong correlation between "High Severity" fires and specific environmental conditions. These conditions are characterized by average temperatures above 30°C and relative humidity below 40%. However, we argue that the key to preventing severe fires is not solely in understanding these climatological factors. It is in the comprehensive analysis of multiple factors, including but not limited to climatological ones. This is because a narrow focus on climatological variables alone does not provide a complete picture of the conditions that lead to the occurrence of more (or less) severe fires.

Keywords: NBR; Climatological variables; Forest fires; Environmental management.

Introdução

Os incêndios florestais ocorrem quando o fogo se desenvolve na vegetação sem que haja qualquer tipo de controle (Costa *et al.*, 2023; Lemos *et al.*, 2010). Este fenômeno consome materiais vegetais combustíveis, desde a ignição até a propagação, avançando conforme as características locais, como, por exemplo, as condições meteorológicas, topográficas, tipos de vegetações (Dunn *et al.*, 2017; Durigan & Ratter, 2016; Fernandes *et al.*, 2016; Finney *et al.*, 2015; Sevinc *et al.*, 2020; Zucchi & Bravo, 2013).

Os incêndios florestais causam danos exaustivos à economia, ao meio ambiente e às pessoas, portanto, promovem desajustes não somente ambientais, mas também econômicos e sociais, e estão, na maioria das vezes, relacionados a ações antrópicas (North *et al.*, 2015; Olawoyin, 2018; Riley *et al.*, 2013; Sevinc *et al.*, 2020).

Dentre as ações humanas, as práticas inadequadas de manejo na agricultura têm grande responsabilidade na ocorrência e no agravamento dos incêndios florestais (Barlow *et al.*, 2012). É comum, por exemplo, no Brasil, o uso do fogo na limpeza de áreas agrícolas ou na expansão da fronteira de plantio (Tetto *et al.*, 2015). Contudo, quando se perde o controle do fogo, áreas de florestas e matas com espécies nativas são atingidas, tornando tal prática uma intervenção danosa ao meio ambiente e, consequentemente, à sociedade (Rodríguez *et al.*, 2012).

Neste contexto, pode-se afirmar que regiões caracterizadas por climas com estações secas prolongadas, material vegetal em abundância e acentuada ocupação humana, associadas a um intenso manejo agrícola, são áreas mais propícias à ocorrência de incêndios (Dunn *et al.*, 2017; Haas *et al.*, 2013; IEF, 2020; Ribeiro *et al.*, 2012; Stephens *et al.*, 2014). Nesse sentido, é importante destacar que o bioma Cerrado é

uma região que reúne essas características e tem sido foco de pesquisas sobre os incêndios florestais, especialmente no que tange o avanço deste fenômeno sobre a vegetação nativa preservada nas Unidades de Conservação (Abreu *et al.*, 2017).

Jesus *et al.*, (2020) realizaram um levantamento dos focos de queima nas Unidades de Conservação presentes nos diferentes biomas brasileiros no período de 2003 a 2017. Os autores observaram que as regiões localizadas no bioma Cerrado, juntamente com a Amazônia, apresentaram a maior densidade de focos. Isso destaca a importância do monitoramento e prevenção nas unidades de conservação contra incêndios florestais, especialmente no Cerrado brasileiro.

Apesar de serem espaços protegidos por lei, dada a importante função de proteção e preservação da vida silvestre e do bem-estar das populações, as Unidades de Conservação foram amplamente afetadas pelos incêndios, especialmente as localizadas no Cerrado Mineiro (*Instituto Estadual de Florestas - IEF - Governo de Minas lança campanha de prevenção a incêndios florestais*, 2020; J. B. D. Jesus *et al.*, 2020; Kovalsyki, 2016). De acordo com o Instituto Estadual de Florestas (IEF, 2020) os casos de incêndios dobraram no ano de 2019, quando comparados com os dados da média histórica registrados de 2012 a 2018. Conforme ressalta (Kovalsyki, 2016), as unidades de conservação estão cada vez mais suscetíveis à propagação de incêndios, destacando a urgência de abordagens eficazes na gestão ambiental para mitigar os impactos desses eventos na biodiversidade e nos ecossistemas.

Dante do exposto, é perceptível que as Unidades de Conservação do Cerrado Mineiro requerem grande atenção, em virtude das condições altamente favoráveis que oferecem aos incêndios florestais, visto que são áreas com grande abundância de materiais combustíveis e condicionantes climáticas propícias a tais eventos, caracterizadas por prolongados períodos de estiagem, altas médias de temperatura e de radiação solar. Conforme defendem (Koproski *et al.*, 2011; Marcuzzo *et al.*, 2014), os incêndios florestais são ameaças contínuas às unidades de conservação que, por sua vez, são as principais responsáveis pela manutenção da biodiversidade. Fica evidente, portanto, a necessidade de um maior monitoramento nessas regiões naturalmente mais susceptíveis.

Localizado na região do Triângulo Mineiro, no Estado de Minas Gerais, o Parque Estadual do Pau Furado (PEPF) é uma importante Unidade de Conservação do Cerrado Mineiro (Oliveira & Marquis, 2002). Entretanto, sua biodiversidade única enfrenta alguns desafios, como os incêndios que assolam sua extensão. Estes incêndios, muitas vezes desencadeados por fatores naturais intrínsecos ao bioma do Cerrado, como a seca e o calor intenso (Oliveira *et al.*, 2022), também são frequentemente resultado de ações antrópicas. Atividades como as práticas agropecuárias, a circulação de pessoas nas estradas e outras atividades econômicas regionais, têm contribuído significativamente para o aumento da frequência e intensidade dos incêndios no parque (Flauzino *et al.*, 2010). Desta forma, no presente trabalho destacou-se o PEPF como área de estudo a ser investigada.

Paralelamente, de acordo com Sibanda (2011) e (Souto *et al.*, 2021), as condições meteorológicas configuram fatores decisivos na frequência com que ocorrem os incêndios e, também, no grau de severidade do fogo. As práticas de queimadas envolve o uso controlado do fogo, muitas vezes realizadas por agricultores para limpar áreas de cultivo, renovar pastagens ou eliminar resíduos agrícolas (A. G. D. Jesus *et al.*, 2020). Por outro lado, incêndios florestais são eventos descontrolados que ocorrem em áreas naturais, provocados na sua grande maioria por atividades humanas acidentais ou intencionais (Silva *et al.*, 2023).

É importante que se estude o impacto das variáveis meteorológicas associadas às diferentes severidades de incêndios deflagrados, a fim de se estabelecer uma relação e permitir um maior controle, prevenção e até mesmo mitigação dos efeitos adversos (Canzian *et al.*, 2020). Nesta pesquisa, direcionamos nossa análise para mapear os focos de calor na zona de amortecimento do PEPF e para realizar uma avaliação remota das possíveis relações entre a severidade dos incêndios e as condições meteorológicas instantâneas.

Com efeito, aqui buscamos compreender a influência das condições meteorológicas adversas no grau de severidade dos incêndios florestais ocorridos na área de estudo. Utilizamos, como estudo de caso, 5 (cinco) incêndios com extensões e severidades distintas. Nossa hipótese é que condições meteorológicas adversas, como altas médias de temperatura, baixa umidade relativa no ar, excessivas radiações solares e o direcionamento dos ventos, desempenham um papel significativo na intensificação e na severidade dos incêndios florestais nesta área de estudo. A hipótese sugere que tais variáveis climatológicas podem influenciar diretamente a propagação do fogo, afetando a dinâmica do evento e contribuindo para níveis mais elevados de severidade. Entretanto, aqui também defendemos que a avaliação de variáveis climatológicas isoladas não permite que se tenha um cenário de leitura ideal para se prever a ocorrência de incêndios severos: são eventos dependentes de múltiplos fatores. Espera-se, assim, demonstrar que as observações devem se estender a múltiplas variáveis ambientais, humanas e de ocasião, para além das climatológicas/instantâneas.

1. Área de estudo

Localizado entre uma área que abrange dois municípios - Araguari e Uberlândia - o Parque Estadual do Pau Furado encontra-se na região do Triângulo Mineiro, Estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). Com uma área de 2.185 hectares, é uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, indicado pelo Decreto nº344 de 16/09/2015 e que está sob a administração do Instituto Estadual de Florestas (IEF).

O parque possui a principal função de proteção e conservação dos ecossistemas que abrangem a região. Conforme o Plano de Manejo do PEPF, além de possuir um zoneamento interno, o parque também apresenta a divisão entre a Zona de Amortecimento (ZA) e a ÁREA Circundante (AC) (Figura 1).

A vegetação natural desta área pertence ao bioma Cerrado, com predominância de fitofisionomias de Cerradão e Mata Semicaducifolia, que se adaptam às condições climáticas sazonais de duas estações, uma seca e com temperaturas médias amenas de abril a outubro, e outra úmida com temperaturas médias mais alta, entre novembro e março (Rodrigues; Souza, 2013).

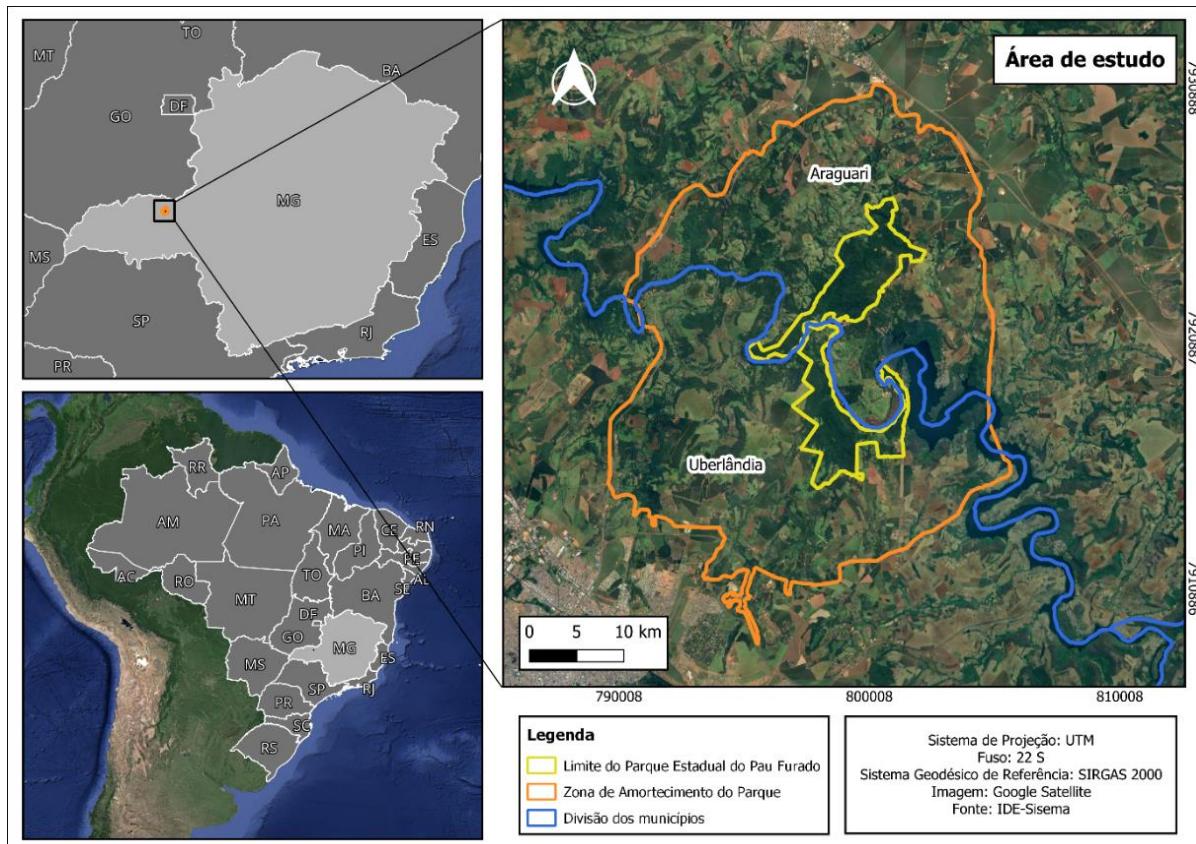


Figura 1: Mapa de Localização, Parque Estadual do Pau Furado
Elaboração: Os autores, 2024.

O Climograma referente a estação meteorológica de Uberlândia, baseado em 30 anos de dados (1992-2022), revela um padrão climático tropical com estações bem definidas (Figura 2). Os meses de verão (dezembro a março) apresentam altas temperaturas e precipitação significativa, beneficiando culturas que dependem de muita água, enquanto o inverno (junho a agosto) é caracterizado por temperaturas mais baixas e mínima precipitação, exigindo planejamento hídrico eficiente. Este padrão reflete um clima quente e úmido no verão e seco e ameno no inverno, essencial para o planejamento agrícola e gestão de recursos naturais (INMET, 2024).

As condições topográficas indicadas por Rodrigues *et al.* (2023) demonstram que a área se encontra no fundo de um relevo do tipo canyon, associados predominantemente a embasamento rochoso vulcânico-sedimentar, com janelas de embasamento metamórfico. Esta configuração implica em condicionamento de uma maior umidade do que nas regiões altas de entorno, tornando o fundo do vale comparativamente mais úmido do que o topo plano do planalto do entorno. São

condições propícias à geração de material vegetal que serve de combustível aos incêndios florestais nas épocas de extrema seca.

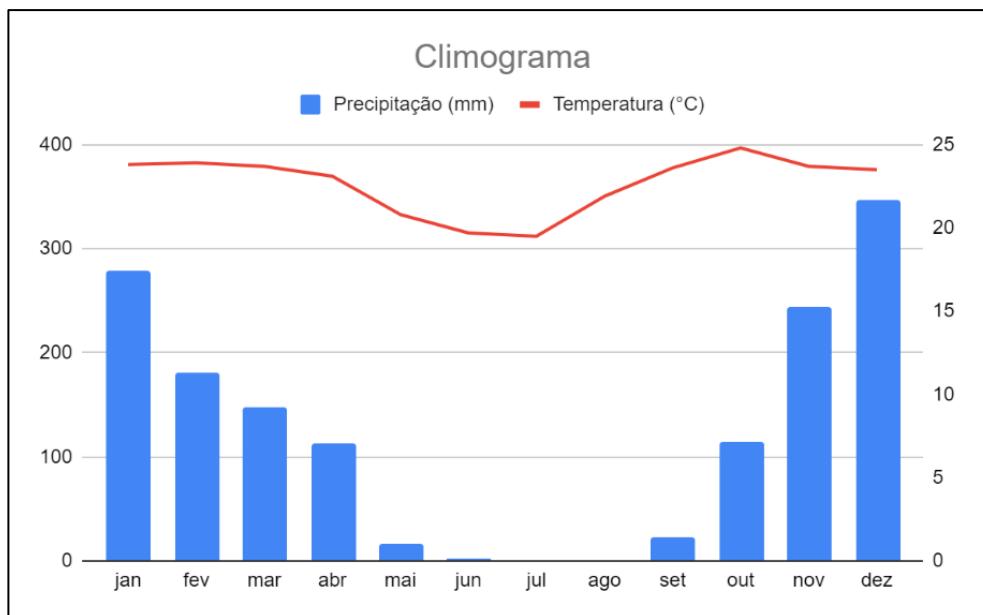


Figura 2: Climograma representando o perfil climático da região, abrangendo dados de 1992 a 2022

Fonte: INMET, 2024.

2. Método

Esta pesquisa foi realizada conforme as etapas procedimentais descritas no fluxograma representado na Figura 3.

Na primeira fase da pesquisa, foram coletados dados meteorológicos da estação automática (A507) localizada em Uberlândia durante os anos de 2018 a 2020, utilizando informações fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esses dados abrangem o período de estiagem, compreendido entre os meses de maio e setembro.

Posteriormente, foram adquiridas imagens do sensor Multispectral Instrument (MSI), embarcado no satélite Sentinel-2, correspondentes à mesma frequência e intervalo temporal das medições meteorológicas. As bandas utilizadas foram a banda 8, que opera no intervalo do infravermelho próximo (NIR) com um comprimento de onda central de 842 nm e uma resolução espacial de 10 metros, e a banda 12, que captura dados no infravermelho de ondas curtas (SWIR) com um comprimento de onda central de 2190 nm e uma resolução espacial de 20 metros.

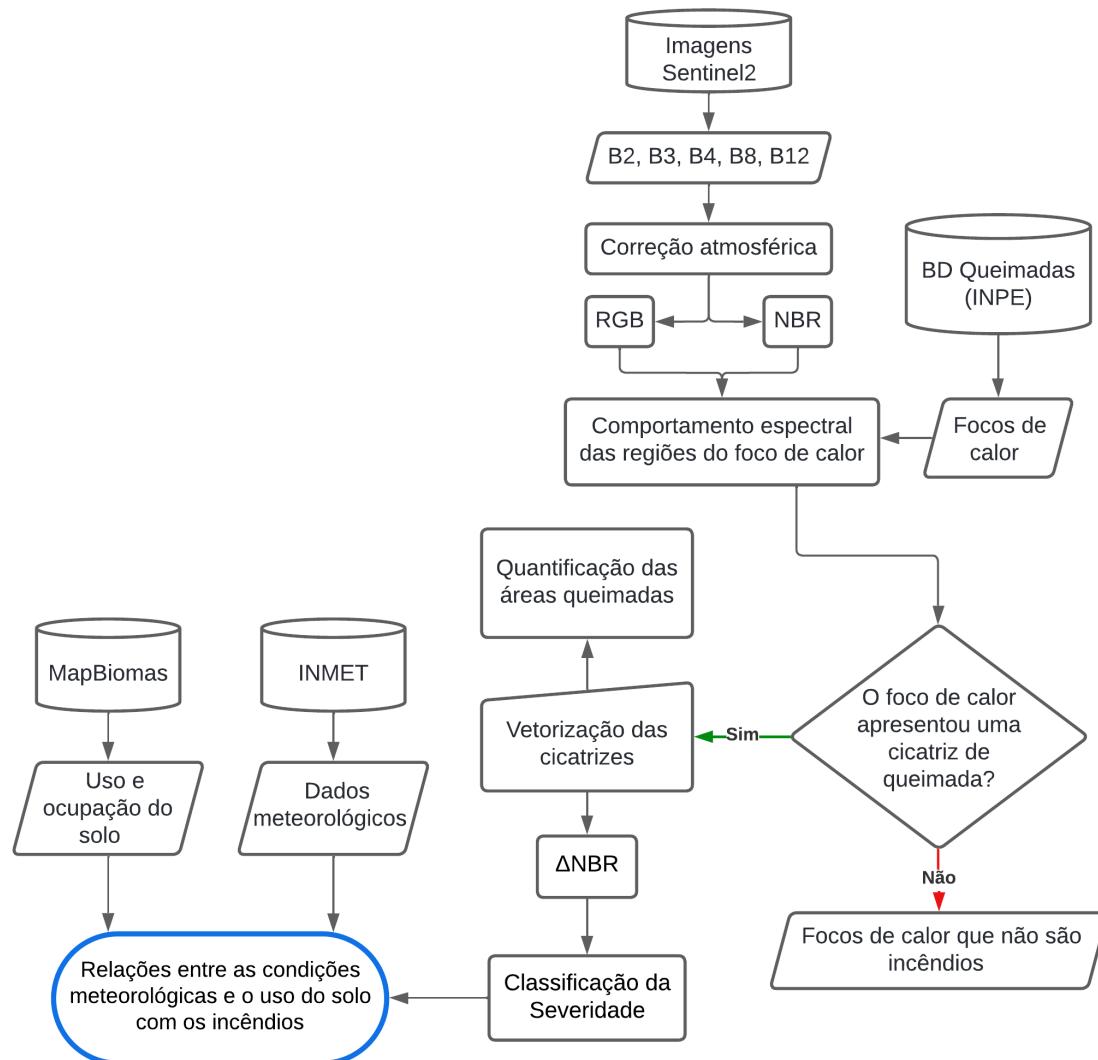


Figura 3: Fluxograma com as etapas de execução desta pesquisa.

Elaboração: Os autores, 2024.

Para mitigar os efeitos da interação da energia eletromagnética com a atmosfera terrestre e uniformizar as condições de avaliação ao longo do tempo, procedeu-se à correção atmosférica utilizando o plugin Semi Automatic Classification (SCP), disponível no software livre QGIS Development Team (2024).

As representações dos mapas de cobertura e uso da terra (Figura 4) foram elaboradas a partir dos dados fornecidos pelo projeto MapBiomas de 2018, 2019 e 2020, seguindo a classificação descrita pelo ATBD (Algorithm Theoretical Basis Document), que detalha todo o processo de desenvolvimento e produção dos mapas, bem como os algoritmos empregados (Souza & Azevedo, 2017). Obtiveram-se, desta forma, dados espaciais relativos ao uso e ocupação do solo nas regiões de ocorrência dos incêndios.

Complementando os dados coletados na fase inicial, foram identificados os registros de focos de calor que ocorreram na área de estudo. Essas informações foram obtidas

por meio do Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2024). A plataforma online do programa permite o acesso a um banco de dados abrangente e atualizado sobre focos de calor no Brasil.

Após a correção atmosférica das imagens, o mapeamento dos incêndios e suas intensidades foi realizado ao longo do intervalo temporal definido. O índice NBR (Normalized Burn Ratio) foi utilizado para tal, devido à sua capacidade de destacar cicatrizes de queimadas e quantificar a severidade dos eventos. O cálculo do NBR foi realizado utilizando as bandas do infravermelho-próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR), conforme descrito por (Key & Benson, 1999; Koutsias & Karteris, 1998). A análise multitemporal foi feita comparando os valores do NBR pré e pós-fogo. A equação do índice NBR é apresentada a seguir:

Equação (1):

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

NIR = Banda 8 (Infravermelho Próximo);

SWIR = Banda 12 (Infravermelho de Ondas Curtas).

O índice NBR permite quantificar a severidade do fogo através da diferença entre NBR pré-fogo ($NBR_{pré}$) e NBR pós-fogo ($NBR_{pós}$), resultando no índice dNBR (diferença do NBR):

Equação (2):

$$dNBR = NBR_{préfogo} - NBR_{pósfogo}$$

Desta forma, a classificação de severidade de incêndio é representada pela Tabela I, que foi adaptada de acordo com os valores propostos por (Key & Benson, 1999). Em seguida, os valores de dNBR serão multiplicados por 10^3 .

Tabela I: Níveis de Severidade e variações dos valores do Dnbr.

Nível de Severidade	Variação do NBR (dNBR)
Alta Regeneração	-500 ~ -251
Baixa Regeneração	-250 ~ -101
Não Queimado	-100 ~ +99
Baixa Severidade	+100 ~ +269
Baixa Moderada Severidade	+270 ~ +439
Alta Moderada Severidade	+440 ~ +659
Alta Severidade	+660 ~ +1350
Anomalia	>+1350

Fonte: Key e Benson, 1999.

A metodologia aqui empregada incluiu, além do mapeamento pelo cálculo dos índices NBR e dNBR, a análise das cicatrizes de queimada por meio de composições coloridas e falsa-cor de bandas para identificar áreas afetadas pelo fogo. Para isso, foi efetuado o download de imagens do satélite Sentinel-2 das regiões que apresentaram registros de focos de calor e criou-se composições de bandas para destacar cicatrizes de queimadas, uma vez que a combustão da vegetação ocasiona o escurecimento da região e acarreta alterações na resposta espectral do espaço afetado (Pio & Vieira, 2020). Como o cálculo para a variação da severidade apresenta uma tendência a confundir solo exposto com áreas afetadas pelo fogo, foi realizada a composição RGB para analisar e filtrar as regiões que realmente apresentaram cicatrizes de queimadas.

Além disso, foi utilizada uma abordagem baseada em porcentagens da classificação da severidade para mensurar a distribuição das diferentes categorias em relação ao total da área atingida, permitindo a identificação das datas com maiores extensões de área com intensidades notáveis.

A análise das cicatrizes de queimada envolveu a vetorização de polígonos representando sua extensão espacial, e a distribuição das diferentes categorias de severidade foi representada graficamente para proporcionar uma análise sobre o grau de severidade dos incêndios florestais na área monitorada.

Essa metodologia permitiu identificar as datas em que ocorreram maiores extensões de área com as intensidades mais notáveis, contribuindo para uma análise mais detalhada da severidade dos incêndios florestais na região.

3. Resultados e Discussão

Tendo em vista a aplicação dos procedimentos, conseguiu-se representar a análise dos registros de focos de calor obtidos pelo INPE nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro para os anos de 2018, 2019 e 2020, delimitados pela zona de amortecimento do Parque Estadual do Pau Furado, conforme ilustra a Figura 4.

Segundo o Decreto nº 2.661, de 8 de Julho de 1998. Regulamenta o parágrafo único do art. 27 da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, mediante o estabelecimento de normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais no Brasil, é proibido utilizar o fogo mesmo sob a forma de queima controlada em áreas contida numa faixa de mil metros de aglomerado urbano de qualquer porte, delimitado a partir do seu centro urbanizado, ou de quinhentos metros a partir do seu perímetro urbano, se superior . No entanto, o fogo ainda é frequentemente utilizado para renovar pastagens e preparar terrenos para atividades agrícolas sem as devidas precauções.

Em áreas de pastagem, a cobertura da superfície é composta por materiais combustíveis finos que são mais dispostos à ignição e propagação do fogo. Dependendo das condições meteorológicas, esses materiais podem propagar o fogo rapidamente, o que pode resultar na perda de controle da queima e na difusão para regiões indesejadas, criando novos incêndios florestais (Torres et al., 2014).

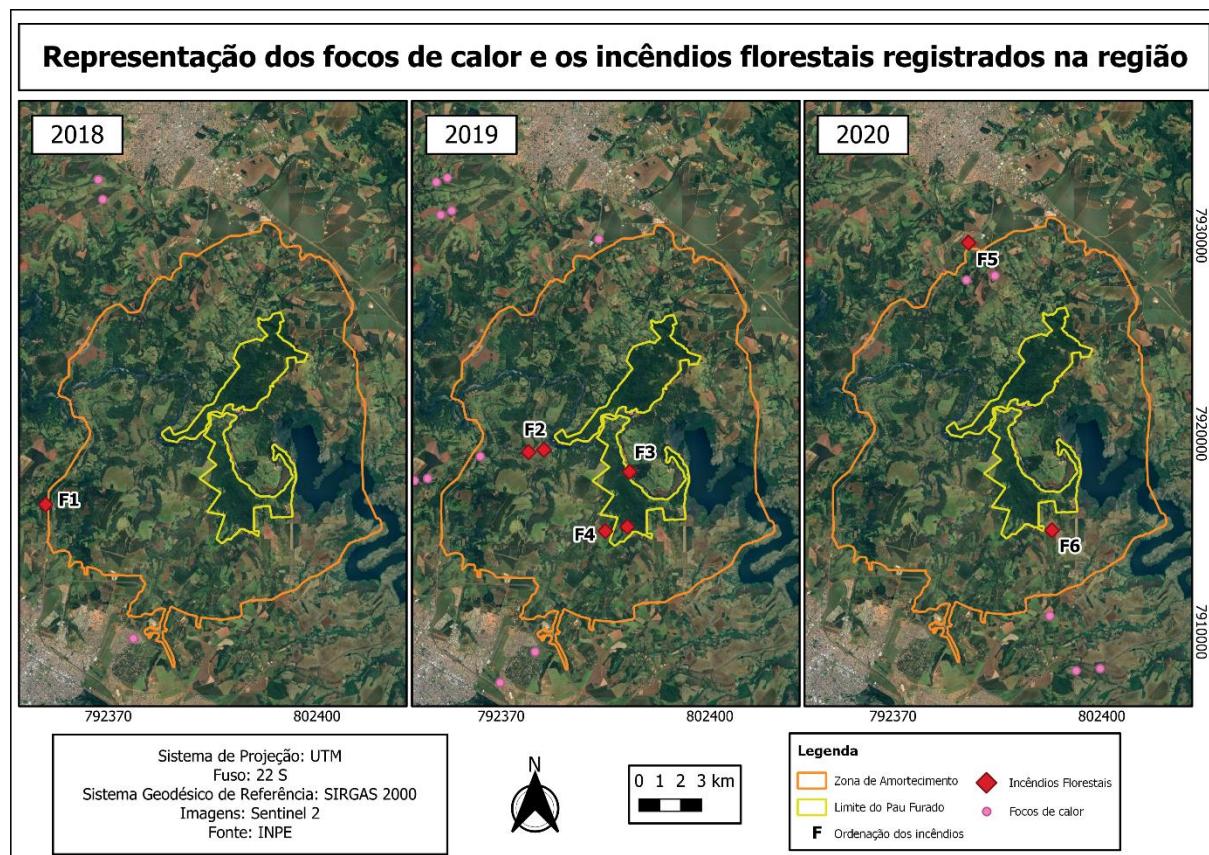


Figura 4: Apresentação dos registros de focos de calor e incêndios florestais na área do PEPF e em sua zona de amortecimento.

Elaboração: Os autores, 2024.

Ao examinar os mapas dos diferentes anos na Figura 5, constatou-se que não houve mudanças significativas no uso do solo entre 2018 e 2020. As áreas afetadas pelos incêndios apresentaram padrões de uso modificados por atividades antrópicas, sendo predominantemente destinadas à pastagem ou agricultura.

Na Figura 5, observa-se que as localidades dos incêndios se concentram majoritariamente nas proximidades do perímetro na região mais ao sul do PEPF, onde a circulação de pessoas é maior, com incêndios possivelmente iniciados por seres humanos.

A Figura 6 representa as cicatrizes de queimada nas regiões confirmadas com ocorrência de incêndios nos pontos de calor. A análise visual simultânea das imagens do satélite Sentinel-2 com uma composição de bandas RGB, juntamente com o cálculo do índice NBR e dNBR, permitiram destacar que, assim como o esperado, nem todo foco de calor registrado na base de dados do INPE (2024) se converte em um incêndio florestal. Isso é evidenciado quando se analisa as alterações espectrais nos índices NBR e dNBR sobre os pontos de calor, valores radicados na combustão do material vegetal que, por conseguinte, altera a resposta espectral esperada.

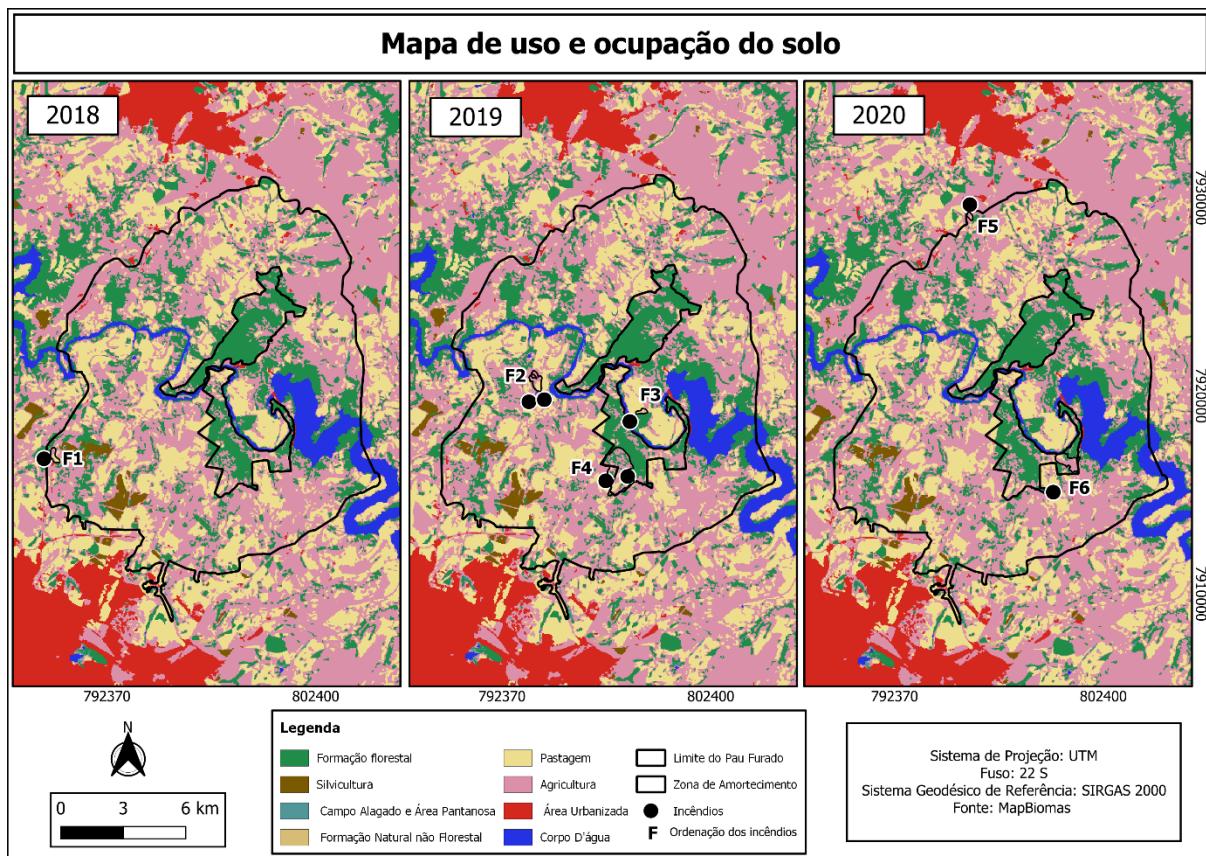


Figura 5: Representação do uso e ocupação do solo nos anos de 2018, 2019 e 2020

Elaboração: Os autores, 2024.

Além disso, a Figura 6 apresenta visualmente as cicatrizes de queimadas e a distribuição das diferentes categorias de severidade dos incêndios em relação à área afetada. Contribuindo para a identificação das datas com maiores extensões e das regiões com intensidades notáveis, permitindo uma análise mais detalhada da severidade dos incêndios florestais na região.

A Tabela II mostra as áreas de uso do solo afetadas pelos incêndios nas diferentes datas analisadas. Observa-se uma variação significativa nas áreas queimadas ao longo do tempo, com destaque para as áreas de agricultura, que apresentaram as maiores porcentagens de área afetada em todas as datas o que evidencia a predominância desse uso do solo nas áreas queimadas em estudo. A formação florestal sofreu danos consideráveis, destacando especialmente os dias 18/09/2019 e 18/09/2020, quando 29,5% e 13,2% da área total afetada, respectivamente, era composta por formações florestais. As áreas de pastagem tiveram variações menores, mas ainda relevantes, como observado em 07/09/2020, quando 54,3% da área queimada foi de pastagem.

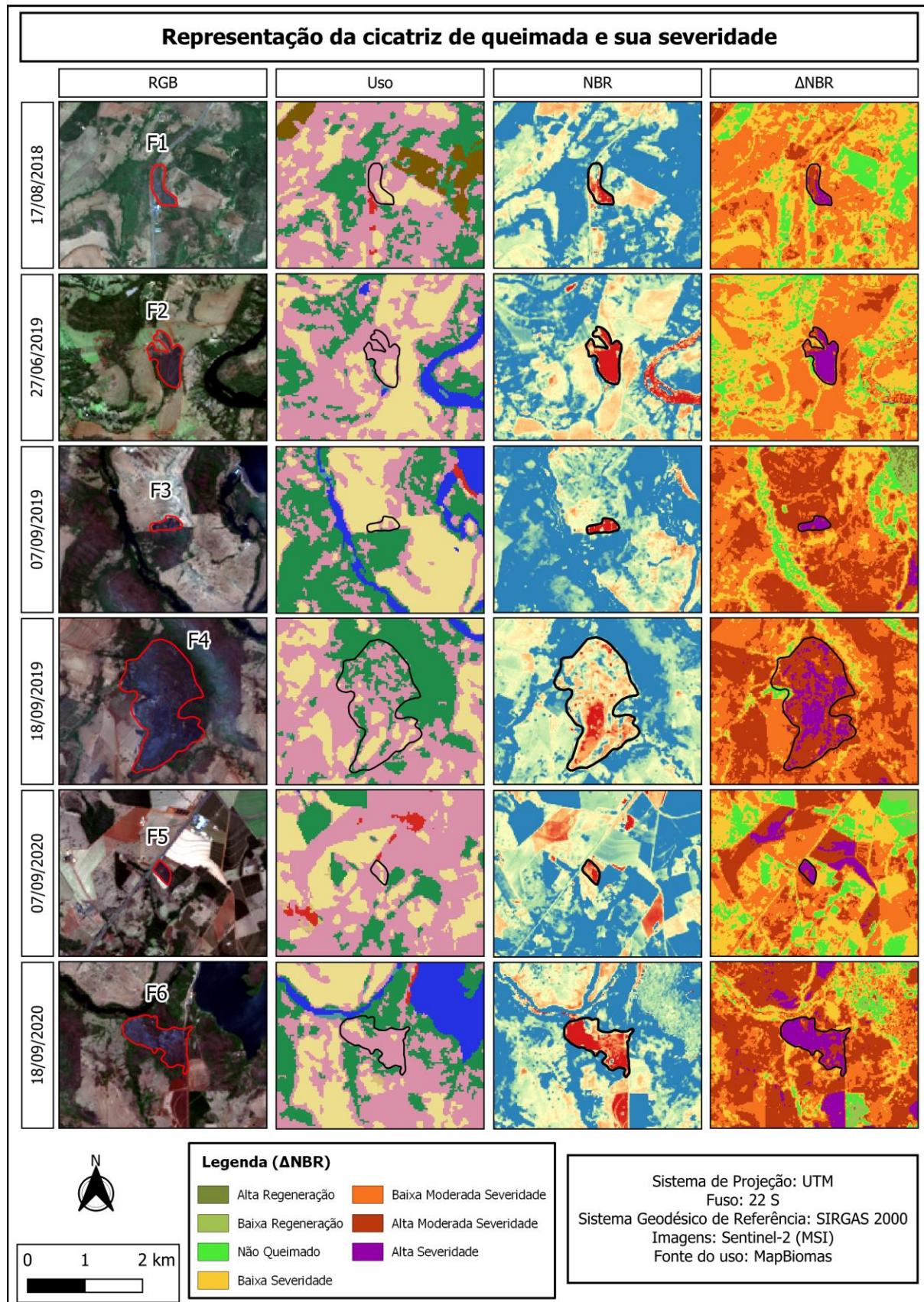


Figura 6: Representação das cicatrizes de queimadas e sua severidade em cada incêndio registrado.

A legenda para a coluna “uso” encontra-se disponível na Figura 5.

Fonte: Os autores, 2024.

Tabela II: Distribuição das áreas de uso do solo afetadas pelos incêndios no PEPF.

Uso	17/07/2018 (F1)		27/06/2019 (F2)		07/09/2019 (F3)		18/09/2019 (F4)		07/09/2020 (F5)		18/09/2020 (F6)	
	área (ha)	%										
Formação florestal	0,00	0,0	0,03	0,1	0,30	3,0	63,16	29,5	0,30	3,8	8,38	13,2
Pastagem	6,12	33,8	10,34	29,1	6,03	60,9	26,14	12,2	4,26	54,3	6,10	9,6
Área antropizada	0,09	0,5	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,01	0,1	0,00	0,0
Agricultura	11,91	65,7	25,15	70,8	3,57	36,1	124,89	58,3	3,27	41,7	49,13	77,2
Total da área (ha)	18,12		35,52		9,90		214,18		7,84		63,61	

Ao se analisar os dados, durante os meses em estudo para o ano de 2018, registrou-se 1 foco de calor na zona de amortecimento do parque, evoluindo para um incêndio florestal confirmado remotamente através das análises visuais das composições realizadas. Já em 2019, houve um aumento nos focos de calor, totalizando 6 registros. No entanto, apenas três dessas ocorrências resultaram efetivamente em incêndios. Por último, em 2020 foram observados 4 focos de calor, sendo que apenas dois destes evoluíram para incêndios. Esses números indicam que alguns focos de calor registrados não necessariamente resultam em incêndios florestais, sendo necessário acompanhar e filtrar os registros com outras validações como os índices espectrais.

De acordo com o INPE (2024), os registros dos focos de calor podem revelar a presença de incêndio em um componente de resolução da imagem (pixel). Dentro desse pixel, é possível identificar uma ou várias áreas distintas de fogo ativo, sendo a detecção representada por um único ponto. Caso a ocorrência de fogo na vegetação seja ampla, sua detecção pode abranger alguns pixels adjacentes, ou seja, vários focos podem estar relacionados a um único evento de maior magnitude. O maior erro na localização dos focos de calor identificados neste trabalho foi de 1300 metros. Este valor é menor que o erro médio de aproximadamente 400 metros, com um desvio padrão de 3 km, relatado pelo Programa Queimadas do INPE para pixels com resolução espacial de 1 a 6 km. Portanto, os dados apresentados demonstram uma precisão relativamente boa na detecção dos focos de calor, comparando-se ao padrão de referência estabelecido pelo INPE.

A combinação da análise visual por meio das composições de bandas RGB e do cálculo do índice NBR revelou que, apesar dos registros dos focos de calor, a proporção de incêndios em relação a esses registros é diferente. Este cenário sugere que fatores, como a análise visual de imagens de satélite e índices específicos são importantes para uma abordagem mais abrangente nas análises dos focos de calor registrados pelo INPE, proporcionando uma confirmação e caracterização remota de eventos como os incêndios florestais.

A Tabela III apresenta os dados relacionados aos incêndios registrados em diferentes datas, fornecendo informações para a compreensão dos fatores climatológicos e suas influências sobre a severidade desses eventos. A severidade máxima mencionada na

tabela corresponde ao valor mais elevado do pixel obtido durante a análise da variação do NBR, destacando os resultados de maior intensidade registrados nas cicatrizes de queimada.

Tabela III: Níveis de Severidade e variações dos valores do NBR.

Dia	Temp. Média (°C)	Umidade Relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação Solar (KJ/m²)	Severidade Máxima (Variação NBR)	Área da Cicatriz (ha)
17/07/2018 (F1)	26,9	31	3,4	2595,2	902	18,12
27/06/2019 (F2)	29,3	29	2,2	1823,2	973	35,52
07/09/2019 (F3)	31,0	29	3,6	2006,1	1086	9,90
18/09/2019 (F4)	35,1	14	2,9	3100,4	931	214,18
07/09/2020 (F5)	32,4	17	2,4	2750,1	968	7,84
18/09/2020 (F6)	28,6	13	2,2	2394,5	1001	63,63

Fonte: Os autores, 2024.

No dia 07/09/2019, por exemplo, observou-se o incêndio com o maior valor de intensidade na sua severidade, com uma temperatura média de 31°C, umidade relativa de 29%, uma velocidade do vento de 3,6 m/s e uma radiação solar de 2006,1 KJ/m². Essas condições climáticas podem contribuir para uma Alta Severidade de 1086, de acordo com a classificação proposta por Key e Benson (1999), resultando em uma área de cicatriz de 9,9 hectares. Este padrão indica que, em condições de temperatura elevada e baixa umidade, a severidade do incêndio pode ser significativamente maior. A variação nos níveis de radiação solar e velocidade do vento pode indicar uma influência significativa na propagação do incêndio, resultando em áreas maiores queimadas.

Por outro lado, o dia 18/09/2019 apresentou, uma temperatura de 35,1°C, umidade relativa de apenas 14%, velocidade do vento de 2,2 m/s e uma alta radiação solar de 3100,4 KJ/m². Isso também resultou em uma Alta Severidade de 931, mas uma área de cicatriz excepcionalmente mais extensa, atingindo 214,18 hectares. Como observado, a probabilidade de incêndios mais severos parece aumentar à medida que as condições climáticas locais se tornam mais quentes e secas. Nesse sentido, Nhongo *et al.* (2019) argumentam que o aumento da probabilidade de incêndios devido a condições meteorológicas adversas é mais prevalente em regiões com temperaturas frequentes acima de 23-26°C e umidade relativa do ar abaixo de 30%. Tais condições intensificam a evaporação e a secagem dos combustíveis, elevando as chances de combustão latente e reuição em áreas previamente afetadas pelo fogo. Nestas regiões, o aumento no número de dias consecutivos com essas condições meteorológicas eleva ainda mais o risco de incêndios. Resultados

corroborando a relação entre fogo, temperatura e umidade do ar foram encontrados por Chang *et al.* (2013), Guo *et al.* (2015); Ye *et al.* (2017).

Já para Setzer & Sismanoglu (2019) no cálculo do risco de incêndio, é essencial analisar a umidade relativa do ar e a temperatura máxima do ar na superfície local, uma vez que o risco aumenta inversamente com a umidade relativa, abaixo de 40%, e diretamente proporcional à temperatura, aumentando para temperaturas acima de 30°C. Além disso, a precipitação, especialmente no dia ou dia anterior ao evento, exerce um efeito significativo na redução da secura, sendo mais eficaz do que se ocorresse semanas antes. Portanto, é crucial incorporar na análise o cálculo do efeito temporal da precipitação, inclusive considerando os ciclos sazonais de estiagem.

No entanto, é importante destacar que a associação entre a severidade e os fatores climáticos não implica em causalidade, outros fatores não analisados como o tipo de vegetação, a topografia da área, as práticas de manejo do solo e as atividades humanas podem contribuir para a dinâmica dos incêndios.

Ainda, a Tabela IV e a Figura 7 apresentam os níveis de severidade de incêndios florestais ao longo de toda a extensão da cicatriz de queimada, onde as porcentagens refletem a distribuição dos pixels dentro da área de estudo, indicando os valores de severidade obtidos. Os resultados envolveram a contagem dos valores em cada pixel após a realização do cálculo da variação de severidade. Esses valores foram posteriormente agrupados em intervalos representativos, proporcionando uma análise sobre o grau de severidade dos incêndios florestais na área monitorada.

Tabela IV: Análise das proporções de áreas conforme os distintos níveis de severidade em cada registro examinado.

Severidade	17/07/2018 (F1)	27/06/2019 (F2)	07/09/2019 (F3)	18/09/2019 (F4)	07/09/2020 (F5)	18/09/2020 (F6)
Alta Regeneração	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Baixa Regeneração	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Não queimado	0,00%	0,11%	0,00%	0,68%	0,00%	0,00%
Baixa Severidade	2,43%	1,77%	0,00%	1,11%	1,49%	0,00%
Baixa Moderada Severidade	17,48%	13,38%	0,79%	5,13%	7,46%	2,48%
Alta Moderada Severidade	49,12%	21,79%	30,43%	61,40%	22,89%	27,02%
Alta Severidade	30,97%	62,94%	68,77%	31,68%	68,16%	70,50%
Anomalia	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

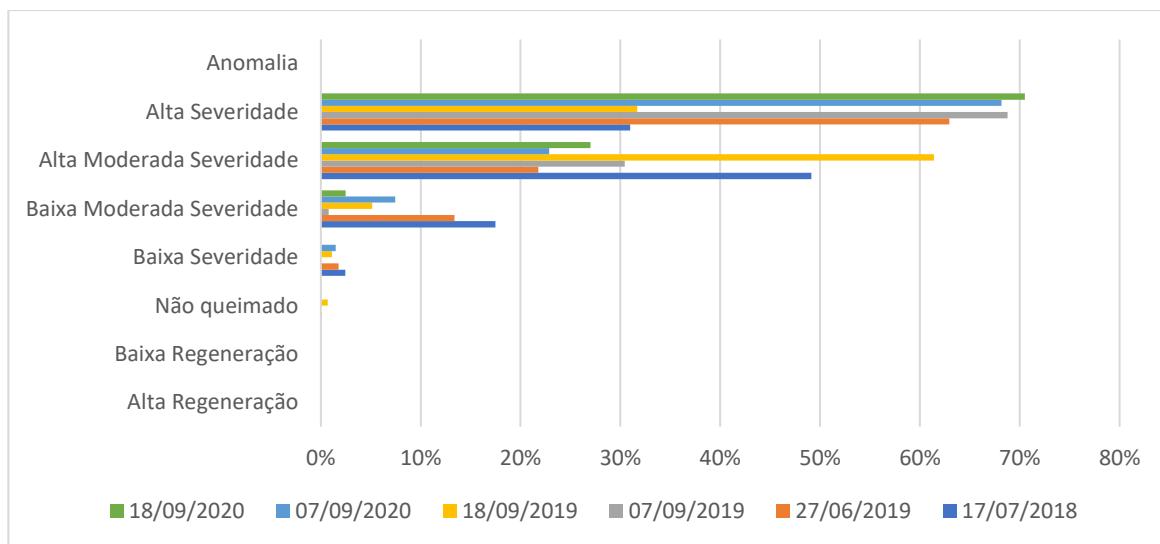


Figura 7: Representação gráfica das proporções de áreas com diferentes níveis de severidade.

Fonte: Os autores, 2024.

Observando-se a distribuição dos resultados (Tabela IV e Figura 7), percebe-se que a categoria "Alta Severidade" apresenta variações consideráveis ao longo das datas analisadas, atingindo picos notáveis nos incêndios registrados nos dias 27/06/2019, 07/09/2019, 07/09/2020 e 18/09/2020, apresentando mais de 60% da área do incêndio com uma alta severidade, o que destaca incêndios com maior magnitude.

Conclusões

Durante o intervalo de tempo deste estudo, a observação direta de imagens captadas por satélites e a análise de índices espectrais, como os índices NBR e dNBR, mostraram-se cruciais para uma abordagem mais completa na validação dos locais com registros de focos de calor, os quais foram disponibilizados pelo INPE. Isso possibilitou a confirmação e a caracterização remota dos incêndios ocorridos naquela área.

Uma das limitações significativas ao utilizar sensoriamento remoto para monitorar incêndios florestais é a precisão limitada na identificação de focos de calor, que não necessariamente correspondem a incêndios confirmados. Além disso, a resolução espacial dos sensores pode não ser suficiente para distinguir pequenos incêndios ou para identificar a exata localização dos eventos de fogo.

A interação entre os fatores meteorológicos desempenha um papel significativo na incidência e na intensidade dos incêndios florestais. Entretanto, a avaliação isolada dos valores dessas variáveis no momento do incêndio não é suficiente para estabelecer uma relação direta de causa e efeito, embora não expliquem todos os casos, contribuem para a compreensão das causas dos incêndios analisados.

Contudo, todos os incêndios analisados apresentaram condições meteorológicas propícias para terem uma classificação de "Alta Severidade", caracterizados por temperaturas médias superiores a 30°C e umidades relativas do ar abaixo de 40%.

Destaca-se o incêndio ocorrido em 18 de setembro de 2019, que afetou a maior extensão de área e apresentou as condições meteorológicas mais extremas.

Estudos como este oferecem informações para instituições governamentais na formulação de políticas de prevenção e controle de incêndios florestais. A evidência da relação entre condições meteorológicas adversas, uso e ocupação e a severidade dos incêndios pode ajudar na implementação de medidas preventivas, como restrições em práticas de queima controlada durante períodos de alto risco. Além disso, o aprimoramento dos sistemas de monitoramento e alerta pode melhorar a capacidade de resposta a incêndios, não apenas no PEPF, mas também em outras unidades de conservação vulneráveis.

Pesquisas adicionais poderiam se dedicar a investigar se as relações identificadas nesta análise permanecem consistentes ou sofrem alterações ao longo dos registros históricos. Isso incluiria a avaliação de registros históricos de precipitação e suas influências nas características do terreno e do material combustível. Além disso, é essencial complementar o trabalho com visitas de campo, incluindo a amostragem de pontos aleatórios no local, antes e depois das queimadas. Essas amostragens são fundamentais para identificar alterações na refletividade das características da paisagem e na subsequente assinatura espectral, fornecendo uma visão mais detalhada e precisa das mudanças ocorridas no ecossistema.

Bibliografia

- Abreu, R. C. R., Hoffmann, W. A., Vasconcelos, H. L., Pilon, N. A., Rossatto, D. R., & Durigan, G. (2017). The biodiversity cost of carbon sequestration in tropical savanna. *Science Advances*, 3(8), e1701284. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701284>
- Barlow, J., Parry, L., Gardner, T. A., Ferreira, J., Aragão, L. E. O. C., Carmenta, R., Berenguer, E., Vieira, I. C. G., Souza, C., & Cochrane, M. A. (2012). The critical importance of considering fire in REDD+ programs. *Biological Conservation*, 154, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.03.034>
- BRASIL. Decreto no 2.661, de 8 de Julho de 1998. *Regulamenta o parágrafo único do art. 27 da Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, mediante o estabelecimento de normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, e dá outras providências*. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2661.htm
- Canzian, W. P., Fiedler, N. C., Pezzopane, J. E. M., Oliveira, C. H. R., & Silva, E. C. G. (2020). Análise de causa e influência de elementos meteorológicos em ocorrências de incêndios em florestas de produção. *Ciência Florestal*, 30, 835–844. <https://doi.org/10.5902/1980509837802>
- Chang, Y., Bu, R., Chen, H., Feng, Y., Li, Y., Hu, Y., & Wang, Z. (2013). Predicting fire occurrence patterns with logistic regression in Heilongjiang Province, China. *Landscape Ecology*, 28. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9935-4>
- Costa, A. D. G., Lima, G. S., Torres, F. T. P., Rodrigues, V. B., Silva Júnior, M. R. D., & Almeida, M. P. D. (2023). Causes and period of occurrence of forest fires in Brazilian federal protected areas from 2006 to 2012. *Ciência Florestal*, 33(2). <https://doi.org/10.5902/1980509869028>

- Dunn, C. J., Thompson, M. P., & Calkin, D. E. (2017). A framework for developing safe and effective large-fire response in a new fire management paradigm. *Forest Ecology and Management*, 404, 184–196. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.039>
- Durigan, G., & Ratter, J. A. (2016). The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. *Journal of Applied Ecology*, 53(1), 11–15. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12559>
- Fernandes, P., Pacheco, A., Almeida, R., & Claro, J. (2016). The role of fire suppression force in limiting the spread of extremely large forest fires in Portugal. *European Journal of Forest Research*, 135, 253–262. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0933-8>
- Finney, M. A., Cohen, J. D., Forthofer, J. M., McAllister, S. S., Gollner, M. J., Gorham, D. J., Saito, K., Akafuah, N. K., Adam, B. A., & English, J. D. (2015). Role of buoyant flame dynamics in wildfire spread. *PNAS*. Doi: 10.1073/pnas.1504498112. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504498112>
- Flauzino, F. S., Silva, M. K. A., Nishiyama, L., & Rosa, R. (2010). Geotecnologias aplicadas à gestão dos recursos naturais da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba no cerrado mineiro. *Sociedade & Natureza*, 22(1), 75–91. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132010000100006>
- Guo, F., Su, Z., Wang, G., Wang, Q., Sun, L., & Yang, T. (2015). [Prediction model of human-caused fire occurrence in the boreal forest of northern China]. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao = *The Journal of Applied Ecology*, 26(7), 2099–2106.
- Haas, J. R., Calkin, D. E., & Thompson, M. P. (2013). A national approach for integrating wildfire simulation modeling into Wildland Urban Interface risk assessments within the United States. *Landscape and Urban Planning*, 119: 44-53., 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.06.011>
- INMET. (2024). Banco de Dados Meteorológicos. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>
- INPE (2024). Banco de Dados de queimadas. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>
- Instituto Estadual de Florestas—IEF (2020). Governo de Minas lança campanha de prevenção a incêndios florestais. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/3110-governo-de-minas-lanca-campanha-de-prevencao-a-incendios-florestais>
- Jesus, A. G. D., Parente, T. G., Cançado, A. C., & Gomes, H. (2020). Prática da cultura da queima nas atividades agropecuárias e suas implicações no estado do Tocantins. *Revista de Políticas Públicas*, 24(1), 205. <https://doi.org/10.18764/2178-2865.v24n1p205-225>
- Jesus, J. B. D., Rosa, C. N. D., Barreto, Í. D. D. C., & Fernandes, M. M. (2020). Análise da incidência temporal, espacial e de tendência de fogo nos biomas e unidades de conservação do Brasil. *Ciência Florestal*, 30(1), 176. <https://doi.org/10.5902/1980509837696>
- Key, C., & Benson, N. (1999). Measuring and remote sensing of burn severity: The CBI and NBR.
- Koproski, L., Ferreira, M. P., Goldammer, J. G., & Batista, A. C. (2011). Modelo de zoneamento de risco de incêndios para unidades de conservação brasileiras: o caso do Parque Estadual do Cerrado (PR). *Floresta*, 41(3). <https://doi.org/10.5380/rf.v41i3.24049>

- Koutsias, N., & Karteris, M. (1998). Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3499–3514. <https://doi.org/10.1080/014311698213777>
- Kovalsyki, B. (2016). Zoneamento de risco de incêndios florestais para o Parque Estadual de Vila Velha e seu entorno. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/46375>
- Lemos, Alexandre Figueiredo de, Edward Elias Junior, Francisco Willian Brito Bezerra, Henrique Leão Teixeira Zaluar, Julia Zapata Rachid Dau, Luciano de Petribu Faria, Marcelo Souza Motta, & Oscar Rensburg Willmersdorf. (2010). *Manual para Formação de Brigadista de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais*. Disponível em: <https://ava.icmbio.gov.br/mod/data/view.php?d=17&rid=3089>
- Marcuzzo, S. B., Araújo, M. M., & Gasparin, E. (2014). Plantio de espécies nativas para restauração de áreas em unidades de conservação: um estudo de caso no sul do brasil. *Floresta*, 45(1), 129. <https://doi.org/10.5380/rf.v45i1.32763>
- Nhongo, E. J. S., Fontana, D. C., Guasselli, L. A., & Bremm, C. (2019). Probabilistic modelling of wildfire occurrence based on logistic regression, Niassa Reserve, Mozambique. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1772–1792. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1615559>
- North, M. P., Stephens, S. L., Collins, B. M., Agee, J. K., Aplet, G., Franklin, J. F., & Fulé, P. Z. (2015). Reform forest fire management. *Science*, 349(6254), 1280–1281. <https://doi.org/10.1126/science.aab2356>
- Olawoyin, R. (2018). Nanotechnology: The future of fire safety. *Safety Science*, 110, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.016>
- Oliveira, P. S., & Marquis, R. J. (Orgs.). (2002). *The cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a neotropical savanna*. Columbia University Press.
- Oliveira, U., Soares-Filho, B., Bustamante, M., Gomes, L., Ometto, J. P., & Rajão, R. (2022). Determinants of Fire Impact in the Brazilian Biomes. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 735017. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.735017>
- Pio, F. P. B., & Vieira, E. M. (2020). Determinação das Áreas Atingidas por Queimadas em Bacias Hidrográficas por meio do Índice De Queimada (NBR), Estudo de Caso da Bacia do Rio Piracicaba-MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(1), 087–101. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p087-101>
- Ribeiro, L., Soares, R. V., & Bepller, M. (2012). Mapeamento do risco de incêndios florestais no município de Novo Mundo, Mato Grosso, Brasil. *CERNE*, 18, 117–126. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000100014>
- Riley, K. L., Abatzoglou, J. T., Grenfell, I. C., Klene, A. E., & Heinsch, F. A. (2013). The relationship of large fire occurrence with drought and fire danger indices in the western USA, 1984–2008: The role of temporal scale. *International Journal of Wildland Fire*, 22: 894–909., 22, 894–909. <https://doi.org/10.1071/WF12149>
- Rodrigues, S. C., & De Souza, N. C. (2013). Mapeamento da fragilidade ambiental no trecho de vazão reduzida do rio Araguari (MG) utilizando técnicas de geoprocessamento. *GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)*, 35, 129. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2013.75443>

- Rodrigues, S. C., Helena Ribeiro Rocha Augustin, C., & Isabela Silva Martins Nazar, T. (2023). Mapeamento Geomorfológico do Estado de Minas Gerais: Uma proposta com base na morfologia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 24(1). <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i1.2233>
- Rodríguez, M. P. R., Soares, R. V., Batista, A. C., Tetto, A. F., Sierra, C. A. M., & Rodríguez, Y. C. (2012). Ajuste e desempenho dos índices de perigo de incêndios nesterov, fma e fma+ na empresa florestal macurije, Cuba. *Floresta*, 42(4), 651. <https://doi.org/10.5380/rf.v42i4.28659>
- Setzer, A. W., & Sismanoglu, R. A. ([s.d.]). Método do cálculo do risco de fogo do programa do INPE - Versão 11, junho/2019.
- Sevinc, V., Kucuk, O., & Goltas, M. (2020). A Bayesian network model for prediction and analysis of possible forest fire causes. *Forest Ecology and Management*, 457, 117723. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117723>
- Sibanda, C. (2011). *Modelling forest fire behaviour and carbon emission in the Ludikhola watershed, Gorkha district, Nepal (public)*. Disponível em: <http://essay.utwente.nl/84989/>
- Silva, R. M. D., Lopes, A. G., & Santos, C. A. G. (2023). Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature. *Journal of Environmental Management*, 326, 116664. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116664>
- Souto, C. A., Freitas, A. C. V., & Martins, G. (2021). Influência das Condições Meteorológicas Atuais e Futuras na Ocorrência de Queimadas e Incêndios Florestais no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(5), 2755–2770. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p2755-2770>
- Souza, C. M., & Azevedo, T. (2017). *MapBiomas General “Handbook”*. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31958.88644>
- Stephens, S. L., Burrows, N., Buyantuyev, A., Gray, R. W., Keane, R. E., Kubian, R., Liu, S., Seijo, F., Shu, L., Tolhurst, K. G., & Van Wagtendonk, J. W. (2014). Temperate and boreal forest mega-fires: Characteristics and challenges. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(2), 115–122. <https://doi.org/10.1890/120332>
- Tetto, A. F., Soares, R. V., Batista, A. C., & Wendling, W. T. (2015). Incêndios florestais atendidos pela klabin do Paraná no período de 1965 a 2009. *CERNE*, 21(3), 345–351. <https://doi.org/10.1590/01047760201521031682>
- Torres, F. T. P., Ribeiro, G. A., Martins, S. V., & Lima, G. S. (2014). Mapeamento da suscetibilidade a ocorrências de incêndios em vegetação na área urbana de Ubá-MG. *Revista Árvore*, 38(5), 811–817. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000500005>
- Ye, T., Wang, Y., Guo, Z., & Li, Y. (2017). Factor contribution to fire occurrence, size, and burn probability in a subtropical coniferous forest in East China. *PLOS ONE*, 12(2), e0172110. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172110>
- Zucchi, V. P., & Bravo, J. V. M. (2013). A Influência dos Elementos Climáticos na Ocorrência de Incêndios na Região de Maringá-PR, nos Anos de 2009/2010 (The Influence of Climatic Factors on the Occurrence of Fire in the Region of Maringá-PR, in the Years 2009/2010). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6(3), 417–426. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v6.3.p417-426>

Artigo recebido em / Received on: 17/12/2022

Artigo aceite para publicação em / Accepted for publication on: 27/12/2022

Physis Terrae - Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente

<https://revistas.uminho.pt/index.php/physisterrae/index>

Página intencionalmente deixada em branco