



Padrões de áreas queimadas e análise de riscos de incêndios florestais no estado do Pará, Brasil

Hana Saiumy Favacho dos SANTOS ¹, Amaury Caldeira de Lima GONÇALVES ²,
Iolanda Laranjeira MOTA ¹, Antônio Francisco Oliveira dos SANTOS ¹, Gabriel de Sousa SILVÉRIO ¹,
Camila Vitória Santos de AQUINO ¹, Giovanne Figueiredo da ROCHA ¹, Yasmim Guedes da SILVA ¹,
Duanne Karine dos Anjos COLARES ¹, Antonio Henrique Cordeiro RAMALHO ¹

¹ Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA, Brasil.

² Programa de Pós Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação Florestal, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA, Brasil.

*E-mail: hanasaiumy2003@gmail.com

Submetido em: 15/06/2026; Aceito em: 05/08/2026; Publicado em: 19/08/2026.

RESUMO: O estado do Pará ocupa, recorrentemente, a posição de principal responsável pelas ocorrências de incêndios florestais na Amazônia. Assim, objetivou-se analisar os padrões espaciotemporais das áreas queimadas no estado entre 1986 e 2021, bem como avaliar a relação entre o risco estimado de ocorrência de incêndios e o histórico de queimadas. Foram utilizados dados do projeto MapBiomass Fire processados no software QGIS. As análises estatísticas, incluindo o teste de Shapiro-Wilk, ANOVA e o teste de Tukey, foram realizadas no software JASP. A modelagem de risco foi realizada por meio de lógica fuzzy, utilizando o plugin Easy Fuzzy no QGIS, considerando variáveis de declividade, altitude, uso e ocupação da terra, temperatura, precipitação, proximidade de estradas e de centros urbanos. Posteriormente, realizou-se uma análise de correlação entre as áreas queimadas e o risco estimado. Os resultados indicaram que o Sudeste Paraense apresentou a maior média de área queimada, com 10.220,94 km², enquanto a mesorregião Metropolitana registrou a menor média, com 67,85 km². Predominaram as classes de risco alto e muito alto. A correlação positiva moderada demonstrou a elevada capacidade do modelo de representar padrões espaciais das áreas queimadas. Conclui-se que a dinâmica das áreas queimadas no Pará está fortemente associada à influência antrópica, embora fatores climáticos e ações humanas não controláveis também afetem os incêndios florestais.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; Amazônia; análise espaciotemporal.

Burned area patterns and wildfire risk analysis in the state of Pará, Brazil

ABSTRACT: The state of Pará has consistently ranked as the leading contributor to wildfire occurrences in the Amazon. Therefore, this study aimed to analyze the spatiotemporal patterns of burned areas in the state between 1986 and 2021, as well as to evaluate the relationship between the estimated wildfire susceptibility risk and the historical occurrence of burned areas. Data from the MapBiomass Fire Project were processed using QGIS software. Statistical analyses, including the Shapiro-Wilk test, analysis of variance (ANOVA), and Tukey's post hoc test, were performed using JASP software. Fire susceptibility risk modeling was performed using fuzzy logic through the Easy Fuzzy plugin in QGIS, considering slope, elevation, land use and land cover, temperature, precipitation, and proximity to roads and urban centers. Subsequently, a correlation analysis was performed between the estimated wildfire susceptibility risk and burned areas. The results showed that the Southeast Pará mesoregion had the highest mean burned area (10,220.94 km²), whereas the Metropolitan mesoregion recorded the lowest mean burned area (67.85 km²). High and very high fire susceptibility risk classes predominated. The moderate positive correlation demonstrated the model's strong ability to represent the spatial patterns of burned areas. It is concluded that the dynamics of burned areas in Pará are strongly associated with anthropogenic influence, although climatic factors and uncontrollable human activities also affect wildfire occurrence.

Keywords: Fuzzy logic; Amazon; spatial-temporal analysis.

1. INTRODUÇÃO

Os Incêndios Florestais (IF) constituem eventos de fogo descontrolado com elevado potencial destrutivo, que incidem sobre formações vegetais em decorrência de fontes antrópicas ou naturais (RAMALHO et al., 2021). Esses eventos configuram-se como um dos principais problemas

ambientais contemporâneos, pois ameaçam a biodiversidade e geram impactos ecológicos, econômicos e sociais significativos (MOREIRA et al., 2020; RAMALHO et al., 2021).

O fogo, descoberto por volta de 7.000 a.C. (Valentim, 2024), desempenha um papel fundamental na história da

humanidade. Inicialmente utilizado para proteção e aquecimento, passou, com o desenvolvimento das sociedades, a ser empregado como ferramenta produtiva na conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas (FIEDLER et al., 2020).

O uso do fogo na agricultura integra, historicamente, o manejo de sistemas produtivos em escala global. No Brasil, a partir da década de 1970, a expansão da fronteira agrícola intensificou essa prática, consolidando o fogo como instrumento de conversão de novas áreas e de manejo agropecuário, sobretudo por sua acessibilidade econômica (COSTA et al., 2022; SOUSA; IRFFI, 2024). Contudo, falhas no planejamento, na gestão de riscos e na alocação de recursos fazem com que pequenos episódios de fogo evoluam para eventos de grandes proporções, na forma de IF (Ramalho et al., 2022), resultando na formação de extensas Áreas Queimadas (AQ).

O bioma Amazônico, caracterizado por florestas tropicais úmidas de elevado valor ambiental e social, apresenta baixa resiliência e resistência a incêndios florestais (IF), sendo considerado um ecossistema sensível ao fogo (RAMALHO et al., 2024). Tais eventos colocam em risco o bem-estar humano, a biodiversidade e a integridade do solo e influenciam processos de mudança climática em escalas regionais e globais (COSTA et al., 2022; SOUSA; IRFFI, 2024; VALENTIM, 2024).

Entre os estados amazônicos, o Pará destaca-se pela elevada incidência de IF, mantendo-se consistentemente na primeira posição do ranking nacional de focos de calor entre 2021 e 2024, segundo dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2025). No estado, uma das principais dificuldades para a mitigação desses eventos reside no desconhecimento de seus padrões, o que evidencia a importância de sua adequada caracterização nos âmbitos espacial e temporal (ALVES; ALVARADO, 2020).

Entretanto, a caracterização dos padrões de ocorrência de IF, embora essencial, sozinha possui caráter descritivo e limitado na explicação integral de tais fenômenos, uma vez que a ocorrência e a propagação do fogo resultam da

interação complexa de variáveis topográficas (declividade e altitude), biológicas (uso e ocupação da terra), meteorológicas (temperatura e precipitação) e socioeconômicas (proximidade de vias e centros urbanos) (TORRES et al., 2017; RAMALHO et al., 2022). Diante disso, é importante que essas informações sirvam de subsídio para a elaboração de análises mais complexas, que considerem as particularidades de cada área frente aos IF.

Nesse contexto, a modelagem espacial de risco de ocorrência dos IF, baseada em análise multicritério destaca-se por integrar múltiplas variáveis e permitir a identificação de áreas mais e menos suscetíveis à ocorrência do fogo. Entre as metodologias disponíveis, a Lógica Fuzzy configura-se como uma alternativa viável e eficaz, ao converter variáveis qualitativas em valores contínuos entre 0 e 1, possibilitando a representação de incertezas e a análise de fenômenos complexos inerentes à dinâmica dos incêndios florestais (RAMALHO et al., 2022; SANTOS et al., 2025).

Apesar desses avanços, os estudos que relacionam diretamente o risco estimado à ocorrência real de áreas queimadas ainda são limitados, o que é fundamental para subsidiar o planejamento de ações preventivas. Assim, objetivou-se analisar os padrões geoespaciais das áreas queimadas no estado do Pará no período de 1986 a 2021, bem como modelar o risco de incêndios florestais com base em múltiplas variáveis, a fim de verificar a correspondência espacial entre as áreas de maior suscetibilidade e as efetivamente afetadas pelo fogo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende o estado do Pará, localizado na região Norte do Brasil, entre os paralelos 3°29'53" N e 10°29'39" S de latitude e os meridianos 59°28'01" O e 45°28'29" O de longitude. Inserido na porção oriental da Amazônia Legal, o estado possui 144 municípios e uma extensão territorial de 1.245.870,70 km², sendo o segundo maior do país, conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025) (Figura 1).

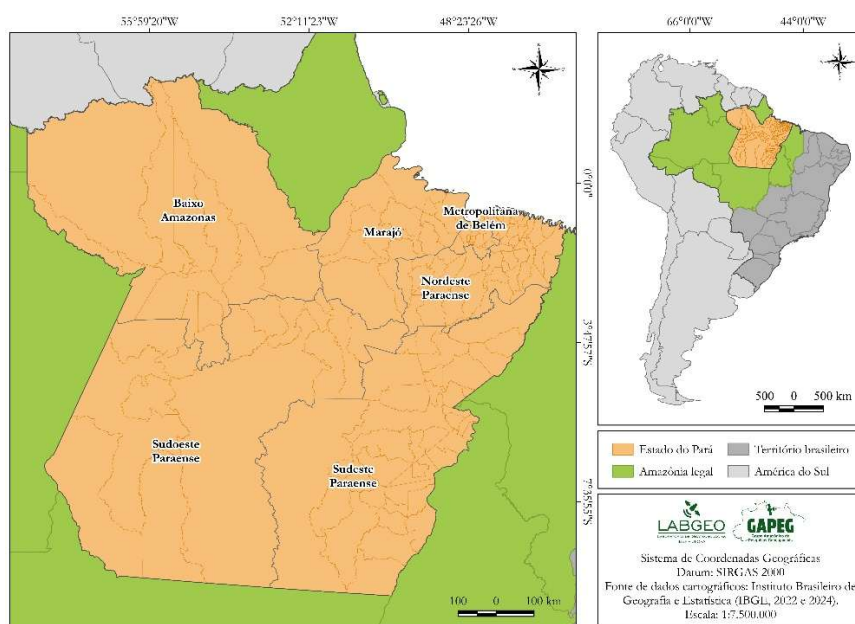


Figura 1. Mapa de localização do estado do Pará e das mesorregiões paraenses.
Figure 1. Location map of the state of Pará and its mesoregions.

De acordo com a classificação climática de Köppen e Geiger (KOTTEK et al., 2006), predomina no território paraense o clima do tipo tropical chuvoso (A), caracterizado por apresentar temperaturas médias anuais superiores a 18 °C. Esse clima se manifesta nas variações “Am”, “Af” e “Aw”, que abrangem, respectivamente, 73,54%, 21,10% e 5,36% do território do estado (MENEZES et al., 2015). A temperatura média do ar varia entre 24 °C e 26 °C, enquanto a precipitação média anual é de 2.087,8 mm (CRISPIM et al., 2023). O clima é marcado por uma estação chuvosa (inverno) e outra seca (verão), denominadas “inverno” e “verão” amazônico (MORAES et al., 2005; CRISPIM et al., 2023). Em relação à cobertura vegetal, observa-se diversidade, abrangendo tanto formações naturais quanto áreas sob influência antrópica, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025).

2.2. Análise geoespacial

2.2.1. Aquisição do banco de dados

Para o desenvolvimento da análise geoespacial, considerou-se um banco de dados composto por arquivos vetoriais e matriciais obtidos em plataformas gratuitas. Os limites oficiais do estado do Pará e de suas mesorregiões (Tabela 1) foram obtidos em formato vetorial, na escala de 1:250.000, por meio do IBGE.

Os dados matriciais referentes às Áreas Queimadas (AQ) anuais foram obtidos da Coleção 3 do projeto MapBiomias Fire, com resolução espacial de 30 m. Foram utilizados dados referentes ao período de 1986 a 2021, contemplando os anos de 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 e 2021, com intervalo de cinco anos entre as datas analisadas, correspondente ao tempo máximo de “pousio”, equivalente a 5 (cinco) anos, que, conforme a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, é suficiente para refletir possíveis processos de regeneração entre os períodos avaliados (BRASIL, 2012). Ressalta-se que 2021 foi adotado como o último ano da série temporal, preservando-se o intervalo quinquenal estabelecido entre os períodos analisados.

Tabela 1. Mesorregiões paraenses e suas respectivas áreas e proporções em relação ao estado do Pará.

Table 1. Mesoregions of the state of Pará and their respective areas and proportions in relation to the state of Pará.

Mesorregião	Área (km²)	Proporção (%)
Sudoeste Paraense	415.792,457	33,37
Baixo Amazonas	340.450,034	27,33
Sudeste Paraense	297.365,669	23,87
Marajó	102.809,692	8,25
Nordeste Paraense	82.571,397	6,63
Metropolitana de Belém	6.881,454	0,55

Fonte: IBGE (2022).

Source: IBGE (2022).

Para a análise de risco, foram utilizadas variáveis ambientais e antrópicas com potencial para influenciar a ocorrência e a propagação de eventos associados ao fogo (RAMALHO et al., 2024). As variáveis declividade e altitude foram obtidas por meio do Google Earth Engine; o uso e a ocupação da terra, pelo MapBiomias; a temperatura média e a precipitação acumulada, pelo WorldClim; e as rodovias e os centros urbanos, pelo OpenStreetMap e pelo IBGE, respectivamente. Posteriormente, esses últimos foram processados para gerar indicadores de proximidade a estradas e centros urbanos.

2.2.2. Pré-processamento de dados geográficos

Após a montagem do banco de dados, procedeu-se ao pré-processamento, utilizando o software QGIS (versão 3.40.0), no qual os arquivos foram reprojetados para o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) South America Albers Equal Area Conic, com o objetivo de padronizar o SRC dos arquivos, a fim de garantir a precisão nos processamentos e nos cálculos de unidades métricas. Considerando a extensão da área de estudo e a necessidade de elevado poder de processamento, todos os arquivos matriciais de entrada foram reamostrado para pixels de 500 metros.

Inicialmente, os arquivos referentes às AQ foram convertidos individualmente para o formato vetorial e submetidos à dissolução. Em seguida, os arquivos resultantes foram filtrados para manter, em cada camada vetorial anual, apenas as feições correspondentes às áreas efetivamente afetadas pelo fogo.

Além disso, foi elaborado um mapa de densidade Kernel das áreas queimadas, a partir da agregação das áreas queimadas de todos os anos analisados, com resolução espacial de 500 metros, que foi posteriormente utilizado na análise de correlação com o mapa de risco.

Os arquivos vetoriais de malha viária e de centros urbanos foram utilizados para gerar as variáveis de proximidade a estradas e a centros urbanos, por meio da metodologia baseada na distância euclidiana, no software QGIS.

2.2.3. Análise dos padrões espaciotemporais de Áreas Queimadas

Nessa etapa, as AQ vetorizadas anuais foram submetidas ao processo de cruzamento espacial com as mesorregiões paraenses, possibilitando a associação geográfica dessas ocorrências às respectivas regiões. Posteriormente, procedeu-se ao cálculo da área das AQ por mesorregião ao longo dos anos, em quilômetros quadrados. Em seguida, as camadas foram exportadas para planilhas eletrônicas, organizadas em colunas com informações sobre anos, mesorregiões e áreas afetadas.

O conjunto de dados foi submetido ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, adotando-se um nível de significância de 5%, no software JASP (versão 0.19.3.0). Constatada a ausência de normalidade (P-valor < 0,001), os dados foram transformados pelo método cúbico inverso (Equação 1) para reduzir a assimetria e aproximar sua distribuição à normalidade, permitindo a aplicação de testes estatísticos paramétricos.

Y' = Y^{1/3} (01)

em que Y' corresponde ao valor transformado e Y é o valor original da variável (km²).

Após a transformação do conjunto de dados, (P-valor = 0,247), procedeu-se à Análise de Variância (ANOVA) e ao Teste de Comparação de Médias de Tukey, ambos com nível de significância de 5%.

2.3. Modelagem de risco de incêndios florestais

A modelagem do risco de incêndios florestais foi realizada por meio da lógica Fuzzy, em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o plugin Easy Fuzzy (Ramalho et al., 2026) no software QGIS.

Inicialmente, o plugin realizou o particionamento aleatório das áreas queimadas no período entre 1986 e 2021 em subconjuntos de treinamento e de validação, de modo que 60% das AQ foram usadas para treinar o modelo e 40% para validar o resultado do treinamento. Posteriormente, cada variável (com exceção do uso e da ocupação da terra) foi reclassificada em cinco classes de intervalo igual, definidas com base nos valores mínimo e máximo. Em seguida, essas classes foram identificadas e ordenadas com base no cruzamento espacial com as amostras de treinamento, estabelecendo um ranqueamento em que a classe 1 representa a maior representatividade e a classe 5, a menor.

As variáveis reclassificadas foram submetidas ao processo de fuzzificação e convertidas em superfícies contínuas, com valores normalizados no intervalo de 0 a 1. Nesse procedimento, as classes de maior representatividade receberam valores de pertinência mais próximos de 1, enquanto as de menor representatividade foram associadas a valores próximos de 0, configurando uma função de pertinência com comportamento Linear Decrescente (Figura 2), em que valores mais elevados resultam em maiores riscos (RAMALHO et al., 2023).

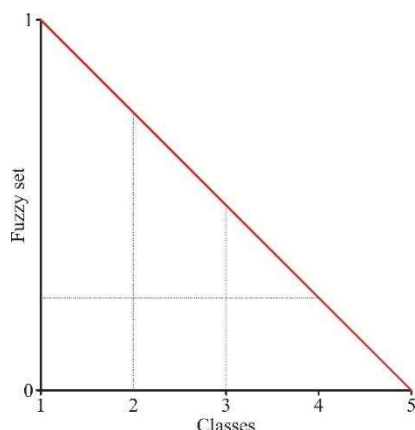


Figura 2. Representação da função Fuzzy linear decrescente
Figure 2. Representation of the decreasing linear fuzzy function.

A variável uso e ocupação da terra na área de estudo possuía 12 classes agrupadas, que foram ordenadas com base em classificação própria dos autores, fundamentada no conhecimento das coberturas e fitofisionomias regionais, a fim de representar de forma mais fiel a suscetibilidade ao fogo, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Classes de risco de suscetibilidade ao fogo, conforme o uso e a cobertura da terra.

Classe de uso e ocupação da terra	Rankeamento
Rio, lago e oceano	1
Área não vegetada	2
Mineração	3
Afloramento rochoso	4
Florestal alagável	5
Mangue	6
Campo alagado	7
Formação florestal	8
Agricultura	9
Formação campestre	10
Formação savânica	11
Pastagem	12

Todos os arquivos matriciais fuzzy foram espacialmente alinhados pelo método de reamostragem bilinear, garantindo correspondência pixel a pixel entre os critérios. A sobreposição das variáveis foi realizada por meio do operador Fuzzy Gamma, com coeficiente de 0,9, resultando em um mapa contínuo de risco em formato matricial, que posteriormente foi reclassificado em cinco classes pelo método de quebras naturais de Jenks (1967), conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Classes de risco de suscetibilidade ao fogo.

Table 3. Fire susceptibility risk classes.

Classe de risco	Intervalo Fuzzy
Muito baixo	$0 \leq x \leq 0.15$
Baixo	$0.15 < x \leq 0.69$
Moderado	$0.69 < x \leq 0.82$
Alto	$0.82 < x \leq 0.91$
Muito alto	$0.91 < x \leq 1.00$

A validação do modelo foi realizada com o subconjunto independente de amostras definido no início da metodologia (40%), por meio da sobreposição ao mapa de risco reclassificado, com análise da distribuição das áreas queimadas nas classes de risco. Ademais, o mapa de risco oriundo do processamento no plugin Easy fuzzy foi poligonizado para fins de cálculo da área (km²) e da proporção (%) de cada classe de risco.

2.4. Análise de correlação entre as áreas queimadas e o mapa de risco

Foi realizada análise de correlação entre o mapa de risco e a densidade de Kernel de áreas queimadas, utilizando o coeficiente de Spearman, adotando-se nível de significância de 5%, considerando todos os pixels da área de estudo. Os dados foram previamente alinhados por reamostragem bilinear, garantindo a correspondência espacial entre as variáveis, a fim de avaliar a relação entre a suscetibilidade estimada no mapa de risco e a ocorrência real dos fenômenos associados ao fogo. A Figura 3 apresenta o fluxograma metodológico adotado neste estudo para alcançar o objetivo proposto.

3. RESULTADOS

Quanto à análise geoespacial de áreas queimadas, a ANOVA (P-valor < 0,001) revelou contrastes estatisticamente significativos entre as médias das áreas queimadas (km²) nas mesorregiões. Assim, o teste de Tukey indicou que as mesorregiões do Baixo Amazonas, Marajó, Nordeste Paraense e Sudoeste Paraense não apresentaram diferenças significativas entre si quanto às médias de área queimada (AQ), correspondendo, respectivamente, a aproximadamente 18,3%, 7,3%, 11,1% e 12,0% da área média total queimada. Por outro lado, essas mesorregiões diferiram significativamente da Metropolitana de Belém, que apresentou a menor participação (0,3%), e do Sudeste Paraense, que concentrou cerca de 50,0% da área média queimada entre as mesorregiões analisadas (Tabela 4). (Tabela 4).

Verificou-se, por análise gráfica, que, nos anos de 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 e 2016, o Sudeste Paraense apresentou valores significativamente superiores de área queimada em comparação às demais mesorregiões analisadas (Figura 4), o que resultou na média elevada registrada para a região.

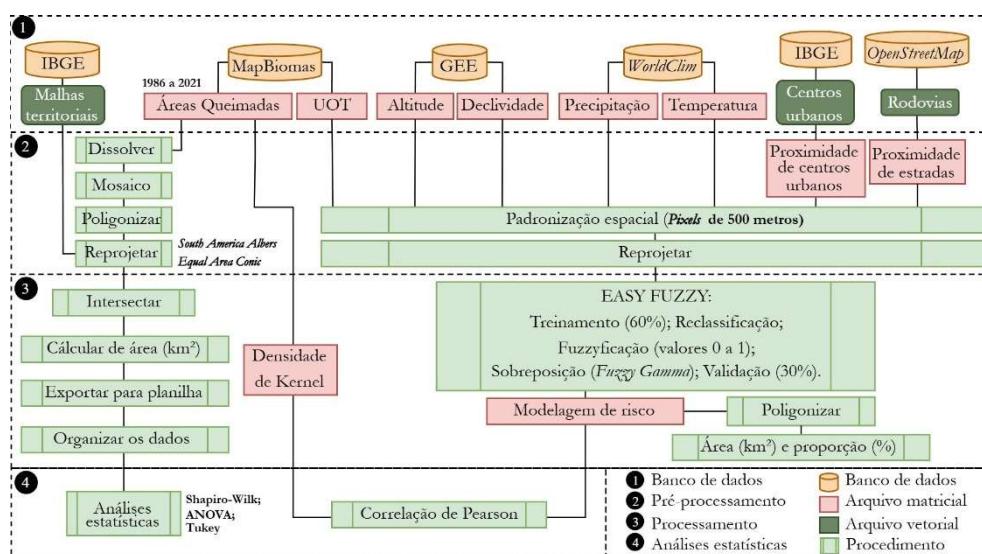


Figura 3. Fluxograma metodológico de desenvolvimento da pesquisa.
Figure 3. Methodological flowchart of the research development.

Tabela 4. Valores médios de áreas queimadas nas mesorregiões paraenses entre 1986-2021 e comparação das médias por meio do teste de Tukey.

Table 4. Mean burned area values in the mesoregions of Pará between 1986 and 2021, and comparison of means using the Tukey test.

Mesorregião	Média de AQ (km ²)
Baixo Amazonas	3.735,87 b
Marajó	1.495,32 b
Metropolitana de Belém	67,85 a
Nordeste paraense	2.260,43 b
Sudeste paraense	10.220,94 c
Sudoeste paraense	2.443,81 b

em que: AQ representa as áreas queimadas em km². Valores seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

where: AQ represents the burned areas in km². Values followed by the same letter do not differ statistically from each other, according to Tukey's test, at the 5% significance level.

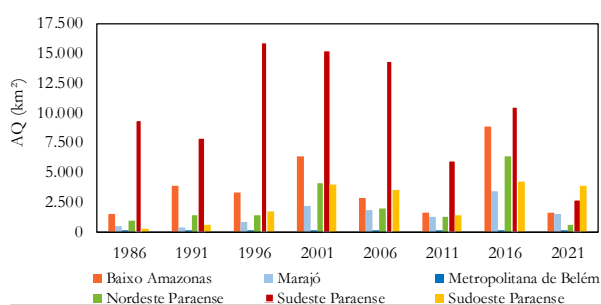


Figura 4. Representação gráfica das áreas queimadas (km²) em cada mesorregião paraense entre 1986 e 2021.

Figure 4. Graphical representation of burned areas (km²) in each mesoregion of Pará between 1986 and 2021.

Com base nas formas de uso da terra, na precipitação e na temperatura média, na proximidade de estradas e centros urbanos, e na altitude e declividade do território paraense, o mapa de risco de incêndios florestais apresentou distribuição espacial heterogênea no estado, com predominância das classes “alto” (497.349,77 km²) e “muito alto” (396.517,73 km²), que, juntas, representam mais de 70% da área do estado. A classe “intermediária” corresponde a 283.084,50 km² (22,74%), enquanto as classes “baixo” (28.693,399 km²)

e “muito baixo” (39.040,22 km²) correspondem a proporções significativamente menores, de 2,31% e 3,14% do território do estado, respectivamente (Figura 5).

A correlação de Spearman entre a modelagem de risco e a densidade de áreas queimadas foi positiva e moderada ($r = 0,5395$; $p < 0,001$), indicando que áreas com maior risco estimado apresentam maior ocorrência de eventos ligados ao fogo. Embora a magnitude do coeficiente sugira que outros fatores não incluídos no modelo também contribuem para explicar a ocorrência do fogo.

4. DISCUSSÃO

O Sudeste Paraense, que apresentou a maior média de área queimada (10.220,94 km²), também se destacou no estudo de Fernandes et al. (2019). Nesse contexto, os autores avaliaram a dinâmica temporal dos focos de calor no Sudeste Paraense entre 2010 e 2017 e observaram que a região registrou os maiores índices do estado, concentrados principalmente entre agosto e outubro, período correspondente à estação seca. Os pesquisadores identificaram forte correlação entre o aumento dos focos e a expansão agropecuária, uma vez que a região é historicamente integrada ao chamado “arco do desmatamento”, área reconhecida pelos intensos processos de conversão florestal e por ignições, além da influência de eventos climáticos, como o El Niño, que intensificam a estiagem e elevam o risco de ignição.

De forma convergente, Soares et al. (2025) evidenciaram que o município de Marabá, situado no Sudeste Paraense, figura entre os mais afetados por incêndios no estado, com 334 focos em 2023, dos quais 152 ocorreram em áreas de pastagem e agrícolas. Complementarmente, Costa et al. (2022) ressaltam que o Sudeste Paraense esteve entre as mesorregiões com maior número de focos de calor entre 2016 e 2019, totalizando mais de 38 mil registros. Nesse mesmo estudo, embora o Sudeste tenha sido apontado como a segunda mesorregião com o maior número de focos, o Sudoeste ocupou a primeira posição, o que difere do resultado do presente estudo. Essa diferença em relação aos resultados do presente estudo pode ser atribuída aos períodos distintos analisados [2016–2019 em Costa et al. (2002) e 1986–2021 neste estudo].

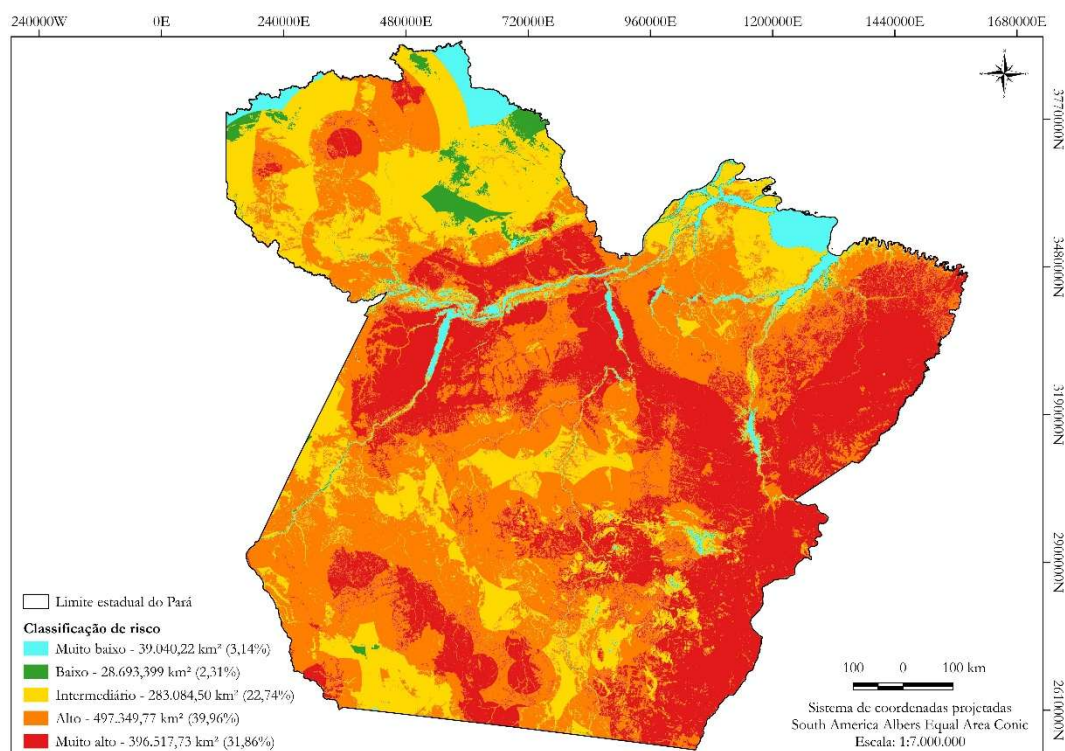


Figura 5. Modelagem fuzzy de risco de incêndios florestais no estado do Pará.

Figure 5. Fuzzy modeling of forest fire risk in the state of Pará.

286

Em contrapartida, a mesorregião Metropolitana de Belém apresentou a menor média de área queimada (67,85 km²), resultado condizente com Costa et al. (2022), que identificaram a Região Metropolitana de Belém como a que apresentou o menor número de focos do estado no período de 2016 a 2019. Segundo esses autores, observa-se um padrão semelhante, no qual as mesorregiões mais urbanizadas tendem a registrar menores índices de focos de calor e de eventos associados ao fogo. Torres et al. (2017) relacionam essa tendência à menor disponibilidade de material combustível e à fragmentação da cobertura vegetal.

As mesorregiões do Baixo Amazonas, Marajó, Nordeste Paraense e Sudoeste Paraense não diferiram estatisticamente entre si, embora apresentem valores médios de área queimada variando de 1.495,32 km² a 3.735,87 km². Essa condição sugere que, embora não se destaque pela magnitude extrema, tais regiões permanecem fortemente influenciadas por padrões estruturais associados às pressões produtivas. Resultados semelhantes foram descritos por Costa et al. (2022), que identificaram a recorrência de focos de calor nessas mesorregiões, em áreas próximas a pastagens e rodovias, reforçando a ideia de que a expansão produtiva, o desmatamento e a acessibilidade constituem fatores determinantes para a ocorrência do fogo.

Tais resultados indicam que a distribuição espacial das áreas queimadas no Pará é consistente com o padrão descrito em estudos sobre incêndios na Amazônia. Morello et al. (2017) apontam que a incidência de fogo está fortemente associada à limpeza e ao preparo de áreas para fins agrícolas e pecuários, sustentando a interpretação de que a dinâmica produtiva regional constitui o principal vetor das áreas queimadas, conforme também observado por Soares et al. (2025) e Costa et al. (2022). Os resultados de Fernandes et al. (2019) reforçam essa compreensão ao demonstrarem que a concentração de focos de calor no Sudeste Paraense resulta

diretamente de pressões socioeconômicas e ambientais. Para além disso, Costa et al. (2022) corroboram essa interpretação ao evidenciar que mais de 70% dos focos de calor do estado estão associados a áreas de uso agropecuário, reforçando o padrão central da influência das atividades humanas na dinâmica das áreas queimadas no Pará.

Nesse sentido, a modelagem de risco desenvolvida neste estudo integrou, de forma espacializada, variáveis ambientais e antrópicas associadas à ocorrência de incêndios, evidenciando que áreas sob maior influência humana, especialmente as situadas próximas à infraestrutura viária, apresentam maior suscetibilidade a incêndios. Estudos como o de Craveira; Silva Neto (2025) corroboram esse padrão ao demonstrar que áreas com maior acessibilidade tendem a concentrar atividades humanas que utilizam o fogo como ferramenta para a conversão e consolidação do uso do solo.

De forma consistente, em seus resultados, Ramos (2025) identificou maior ocorrência de incêndios em faixas de até 1–2 km de rodovias, com concentração recorrente de áreas queimadas ao longo de vias principais e acessos secundários. Adicionalmente, os resultados de Silveira et al. (2008) sugerem que fragmentos florestais próximos a centros urbanos apresentam maior exposição a perturbações antrópicas, o que aumenta o risco de incêndio. Em escala regional, Gama et al. (2019) observaram, em uma unidade de conservação situada no Sul do Pará, a concentração de focos de calor em áreas sob intensa pressão antrópica, associada à expansão de pastagens e à redução da cobertura florestal, reforçando o papel das atividades humanas como fator determinante na ocorrência de incêndios florestais.

A correlação positiva moderada indica que o modelo foi capaz de captar padrões espaciais relevantes da suscetibilidade ao fogo. Entretanto, a magnitude do coeficiente evidencia que a ocorrência de incêndios não pode ser completamente explicada por esses fatores. Torres (2017)

explica que tais eventos são complexos e que seu comportamento é determinado por um conjunto de processos acoplados e de difícil modelagem.

Parte dessa dificuldade de modelagem está associada a fontes de ignição de caráter difuso e imprevisível, sem padrão espacial consistente, como o uso intencional do fogo em práticas agropecuárias, a negligência em atividades cotidianas e a ações criminosas (RAMALHO, 2022; SOUSA; IRFI, 2024). Além disso, embora menos frequentes, incêndios de origem natural, como os provocados por descargas elétricas, também contribuem para essa variabilidade e apresentam baixa previsibilidade (RAMALHO, 2022). Nesse contexto, o modelo representa adequadamente o potencial de risco e a distribuição espacial das áreas suscetíveis, mas não a ocorrência pontual dos eventos, que, conforme destacado por Torres (2017), depende da ativação de fontes de ignição e da interação entre fatores ambientais e antrópicos.

5. CONCLUSÕES

Os padrões espaciais dos incêndios florestais no estado do Pará evidenciam diferenças significativas entre as mesorregiões, refletindo a influência direta da dinâmica produtiva e da ocupação do território.

O Sudeste Paraense concentra as maiores médias de áreas afetadas, associadas à intensificação da agropecuária e à inserção da região no arco do desmatamento, enquanto a mesorregião Metropolitana de Belém apresenta os menores valores, em função da maior urbanização e da menor cobertura vegetal contínua.

A modelagem de risco indica predominância das classes alto e muito alto no estado, associadas principalmente a áreas sob uso antrópico, evidenciando a forte influência das atividades humanas sobre a suscetibilidade ao fogo.

6. REFERÊNCIAS

- ALVES, D. B.; ALVARADO, S. T. Variação espaço-temporal da ocorrência do fogo nos biomas brasileiros com base na análise de produtos de sensoriamento remoto. **Geografia**, v. 44, n. 2, p. 321-345, 2020. <https://doi.org/10.5016/geografia.v44i2.15119>
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera e revoga dispositivos legais anteriores.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 maio 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm. Acesso em: 30 out. 2025.
- CEM_Centro de Estudos da Metrópole. **Zonas Climáticas do Brasil, segundo Köppen. Bases Cartográficas do Centro de Estudos da Metrópole.** 2021. Disponível em: https://centrodametropole.fflch.usp.br/pt-br/download-dedados?busca_geral=clima+koppen&items_per_page=20. Acesso em: 20 jun. 2025.
- COSTA, R. R.; OLIVEIRA, B. L.; PAIVA, P. F. P. R.; ROCHA, E. S. da; SILVA JUNIOR, O. M. da; CARNEIRO, F. da S.; PINHEIRO, K. A. O.; AMORIM, M. B. Análise dos focos de calor no estado do Pará no período de 2016 a 2019. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, e31611625793, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.25793>
- CRAVEIRA, K. O.; SILVA NETO, J. C. A. Mapeamento de Risco a queimadas e incêndios florestais na zona de influência da Rodovia BR-163, no Pará. **Confins**, v. 66, e13lv9, 2025. <https://doi.org/10.4000/13lv9>
- CRISPIM, D. L.; SILVA, M. N. A.; SILVA, A. J. S.; LEAL, R. E.; MELLO, A. L.; BITTENCOURT, J. C.; CHAVES, L. M. L. Análise do Comportamento e da Tendência da Precipitação Pluvial no Estado do Pará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XXV. **Anais...** Aracaju: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHIDRO), 2023. 10p. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14756>
- FERNANDES, T.; HACON, S. de S.; NOVAIS, J. W. Z. Dinâmica temporal de focos de calor e seus condutores de pressão no território do Sudeste Paraense. **Nativa**, v. 7, n. 6, p. 681-692, 2019. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i6.7909>
- FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. M.; RAMALHO, A. H. **Incêndios Florestais.** 1. ed. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica, 2020. 242p.
- GAMA, L. H. O. M.; OLIVEIRA M. J. T.; SILVA, T. C. C.; NEVES, S. A. O.; DIAS, G. F. M. Dinâmica de uso do solo e sua relação com os focos de calor na Área de Preservação Ambiental Triunfo do Xingu-PA. **Enciclopédia Biosfera**, v. 16, n. 29, p. 688-701, 2019. http://dx.doi.org/10.18677/encibio_2019a56
- IBGE_Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Vegetação por Estado - Mapas por estado.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/22460-vegetacao-por-estado.html>. Acesso em: 03 nov. 2025.
- INPE_Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **BD Queimadas.** Disponível em: <https://terrabrasil.dpi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/#graficos>. Acesso em: 05 nov. 2025.
- JENKS, G. F. The data model concept in statistical mapping. **International Yearbook of Cartography**, v. 7, p. 186-190, 1967.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, p. 259-263, 2006. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L.; ROCHA, E. J. P. da. O Uso da estatística para regionalização da precipitação no Estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, p. 64-71, 2015. <https://doi.org/10.5380/abclima.v16i0.40023>
- MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L. da.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Acta Amazônica**, v. 32, n. 2, p. 207-214, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000200010>
- MOREIRA, P. A. G.; MENDES, T. A.; SANTOS, D. F. dos. Avaliação de locais potenciais para instalação de torres de observação para prevenção de risco de incêndios florestais. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 1266-1282, 2020. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509839686>
- MORELLO, T. F.; RAMOS, R.; STEIL, L.; PARRY, L.; BARLOW, J.; MARKUSSON, N.; FERREIRA, A. Fires in Brazilian Amazon: Why does policy have a limited impact? **Ambiente & Sociedade**, São Paulo v. XX, n. 4, p. 19-38, 2017. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0232r1v2042017>
- RAMALHO, A. H. C. et al. **Easy Fuzzy QGIS.** 2026. Disponível em: <https://plugins.qgis.org/plugins/author/Prof.%20Dr.%20Antonio%20Henrique%20Cordeiro%20Ramalho%20>

and%20Fl%C3%A1vio%20Hebert%20da%20Silva%20Fonseca/

- RAMALHO, A. H. C. **Modelagem Geotecnológica de Predição, Prevenção, Detecção e Combate a Incêndios Florestais**. 118f. Tese [Doutorado em Ciências Florestais] - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2022.
- RAMALHO, A. H. C.; FIEDLER, N. C.; DIAS, H. M.; PELUZIO, T. M. de O.; SANTOS, A. R. dos; LUCAS, F. M. F. Compreendendo a ação do fogo nos ecossistemas brasileiros. **Biodiversidade Brasileira**, v. 14, n. 1, p. 8-25, 2024. <http://dx.doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v14i1.2180>
- RAMALHO, A. H. C.; FIEDLER, N. C.; SANTOS, A. R. dos; JUVANHOL, R. S.; PELÚZIO, T. M. de O.; DIAS, H. M.; PEREIRA, R. S.; MAFFIOLETTI, F. D.; ARAÚJO, J. S.; ARAGÃO, M. de A.; GUANAES, G. M. da S.; BIAZATTI, L. D.; LUCAS, F. M. F. Modelo ótimo de alocação de torres de detecção de incêndios florestais em áreas protegidas baseado no risco de ocorrência de incêndio: Onde e como agir? **Canadian Journal of Forest Research**, v. 54, n. 1, e0084, 2024. <http://dx.doi.org/10.1139/cjfr-2023-0084>
- RAMALHO, A. H. C.; FIEDLER, N. C.; MENEZES, R. A. S.; BIAZATTI, L. D.; CARMO, F. C. de A. do; SILVA, E. C. G. da. Eficiência de combate aos incêndios florestais em Unidades de Conservação brasileiras. **Nativa**, v. 9, n. 4, p. 393-400, 2021. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i4.12366>
- RAMOS, C. J. P. **Mapeamento das severidades de incêndio florestal, perdas de carbono e análise das variáveis da paisagem que influenciam a sua ocorrência em uma área da Amazônia Central**. 157f. Tese [Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais] - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2025.
- SANTOS, H. S. F.; AQUINO, C. V. S. de; COLARES, D. K. dos A.; ROCHA, G. F. da; MOTA, I. L.; COLARES, J. G. F.; SANTOS JUNIOR, J. M. F.; PINTO, W. L.; SILVA, Y. G. da; RAMALHO, A. H. C. **Áreas Aptas para Cultivos Consorciados de Cacau e Mogno-Africano na Mesorregião do Marajó (PA)**. In: CONGRESSO NORDESTINO DE ENGENHARIA FLORESTAL & WORKSHOP NACIONAL SOBRE INOVAÇÃO FLORESTAL, VIII. **Anais...** Maceió: CECA/UFAL, 2025. 4p. Disponível em: <https://doity.com.br/anais/viiiiconeflor/trabalho/458488>
- SILVEIRA, H. L. F. da; VETTORAZZI, C. A.; VALENTE, R. de O. A. Avaliação multicriterial no mapeamento de risco de incêndios florestais em ambiente SIG, na bacia do Rio Corumbataí, SP. **Revista Árvore**, v. 32, n. 2, p. 259-268, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000200009>
- SOARES, B. L.; NASCIMENTO, M. L. F.; ROCHA, L. S. DA; SOUZA, V. S. DE; ERAS, L. E. C.; SOUZA, M. A.; SILVA, D. K. N. da. Desenvolvimento de um protótipo de detecção e prevenção de incêndios para a agricultura familiar no sudeste do Pará. In: SEMINÁRIO INTEGRADO DE SOFTWARE E HARDWARE (SEMISH), 52. **Anais [...]**. Maceió/AL. p. 417-428, 2025.

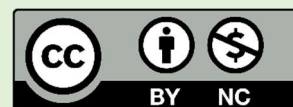
- SOUSA, W. L.; IRFFI, G. Focos de calor na América do Sul: evidências para o período de 2002 a 2018. **Estudos Econômicos**, v. 54, n. 2, e53575422, 2024. <https://doi.org/10.1590/1980-53575422wlgj>
- TORRES, F. T. P.; ROQUE, M. P. B.; LIMA, G. S. L.; MARTINS, S. V.; FARIA, A. L. L. Mapeamento do risco de incêndios florestais utilizando técnicas de geoprocessamento. **Floresta e Ambiente**, v. 24: e00025615, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.025615>
- VALENTIM, S. M. S. Ecologia do fogo e o cenário dos incêndios no Pantanal. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 27, n. 3, p. 4-21, 2024. <https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2024.v27i3.2378>

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Grupo Amazônico de Pesquisas Geoespaciais (GAPEG) pelo suporte técnico e institucional durante o desenvolvimento deste estudo. Agradecem também ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e ao Projeto MapBiomias pela disponibilização dos dados espaciais e ambientais utilizados nas análises.

Contribuições dos autores: H.S.F.S.: conceituação, metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, redação (versão original); A.C.L .G.: metodologia, administração ou supervisão, validação, redação (revisão e edição); I.L.M.: metodologia; A.F.O.S.: investigação ou coleta de dados, validação; G.S.S.: metodologia, investigação ou coleta de dados; C.V.S.A.: investigação ou coleta de dados; G.F.R.: metodologia, análise estatística, redação (versão original); Y.G.S.: conceituação, metodologia, redação (revisão e edição); D.K.A.C.: metodologia, investigação ou coleta de dados, validação; A.H.C.R.: conceituação, metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, administração ou supervisão, validação, redação (revisão e edição). Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos por e-mail, mediante solicitação ao autor correspondente.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflitos de interesses.



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).