ReGeo ISSN: 2177-3246

# ANÁLISE TEMPORAL E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CICATRIZES DE FOGO NO ESTADO DO AMAPÁ (1985–2024)

# TEMPORAL ANALYSIS AND SPATIAL DISTRIBUTION OF FIRE SCARS IN THE STATE OF AMAPÁ (1985–2024)

# ANÁLISIS TEMPORAL Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CICATRICES DE FUEGO EN EL ESTADO DE AMAPÁ (1985–2024)

https://doi.org/10.56238/revgeov17n10-099

**Data de submissão:** 14/09/2026 **Data de publicação:** 14/10/2026

**Yago Rian Almeida Costa**
Graduação em Engenharia Florestal
Instituição: Universidade do Estado do Amapá (UEAP)
E-mail: yagorian112@gmail.com

**Mariana Martins Medeiros de Santana**
Doutora em Ecologia
Instituição: Universidade do Estado do Amapá (UEAP)
E-mail: mariana.medeiros@ueap.edu.br

**Fernando Galvão Rabelo**
Doutor em Biodiversidade e Biotecnologia
Instituição: Universidade do Estado do Amapá (UEAP)
E-mail: mariana.medeiros@ueap.edu.br

**Rodrigo Nogueira de Vasconcelos**
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: rnv@uefs.br

**Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha**
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: wrocha@uefs.br

## RESUMO

O estado do Amapá destaca-se no cenário amazônico como a unidade federativa com o mais elevado índice de preservação florestal da Amazônia Legal. Neste contexto, compreender a dinâmica temporal e espacial das cicatrizes de fogo é fundamental para subsidiar estratégias de manejo e políticas públicas de prevenção. Este estudo analisou a distribuição temporal e espacial das cicatrizes de fogo no Amapá entre 1985 e 2024, utilizando dados da Coleção 5 do MapBiomas Fogo. A metodologia integrou testes de normalidade (Shapiro-Wilk), comparação entre décadas (ANOVA), detecção de tendências (Mann-Kendall), avaliação da influência do El Niño (teste t) e análise de autocorrelação (ACF e PACF). Para a análise espacial, foram elaborados mapas temáticos das cicatrizes de fogo para os períodos de 1985-1994, 1995-2004, 2005-2014 e 2015-2024. O teste de Shapiro-Wilk confirmou a normalidade dos dados ($W = 0,9663$; $p = 0,274$), enquanto a ANOVA não revelou diferenças significativas entre as médias decadais ($F = 2,17$; $p = 0,108$). No entanto, o teste de Mann-Kendall detectou tendência

significativa de aumento ($\tau$ = 0,2513; p = 0,0231), com crescimento de 73% na média decadal. A análise ACF/PACF revelou dependência temporal significativa, com autocorrelação positiva em lag 1 ($\rho_1 \approx 0,35$), indicando "memória" do sistema. Apesar de alguns anos de maior área queimada terem coincidido com eventos de El Niño, não foi observada diferença estatisticamente significativa. Espacialmente, os mapas revelaram expansão progressiva do fogo, inicialmente restrito às savanas (1985-1994), avançando para áreas de floresta na última década (2015-2024). Conclui-se que o Amapá enfrenta um cenário de intensificação do fogo, com expansão geográfica e pressão sobre ecossistemas sensíveis.

**Palavras-chave:** Cicatrizes de Fogo. Área Queimada. Séries Temporais. MapBiomas Fogo. Amazônia.

**ABSTRACT**
The state of Amapá stands out in the Amazonian context as the federative unit with the highest forest preservation index in the Legal Amazon. In this context, understanding the spatiotemporal dynamics of fire scars is essential to support management strategies and public prevention policies. This study analyzed the temporal and spatial distribution of fire scars in Amapá between 1985 and 2024 using data from MapBiomas Fire Collection 5. The methodology integrated normality tests (Shapiro-Wilk), decadal comparisons (ANOVA), trend detection (Mann-Kendall), assessment of El Niño influence (t-test), and autocorrelation analysis (ACF and PACF). For spatial analysis, thematic maps of fire scars were created for the periods 1985-1994, 1995-2004, 2005-2014 and 2015-2024. The Shapiro-Wilk test confirmed data normality (W = 0.9663; p = 0.274), while ANOVA revealed no significant differences between decadal means (F = 2.17; p = 0.108). However, the Mann-Kendall test detected a significant increasing trend ($\tau$ = 0.2513; p = 0.0231), with a 73% increase in the decadal mean. ACF/PACF analysis revealed significant temporal dependence, with positive autocorrelation at lag 1 ($\rho_1 \approx 0.35$), indicating system "memory." Even though some years with larger burned areas coincided with El Niño events, no statistically significant difference was observed. Spatially, maps revealed progressive fire expansion, initially restricted to savannas (1985-1994), advancing into forest areas in the last decade (2015-2024). We conclude that Amapá faces a scenario of fire intensification, with geographic expansion and pressure on sensitive ecosystems.

**Keywords:** Fire Scars. Burned Area. Time Series. MapBiomas Fire. Amazon.

**RESUMEN**
El estado de Amapá se destaca en el escenario amazónico como la unidad federativa con el más elevado índice de preservación forestal de la Amazonía Legal. En este contexto, comprender la dinámica temporal y espacial de las cicatrices de fuego es fundamental para subsidiar estrategias de manejo y políticas públicas de prevención. Este estudio analizó la distribución temporal y espacial de las cicatrices de fuego en Amapá entre 1985 y 2024, utilizando datos de la Colección 5 del MapBiomas Fuego. La metodología integró pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk), comparación entre décadas (ANOVA), detección de tendencias (Mann-Kendall), evaluación de la influencia de El Niño (prueba t) y análisis de autocorrelación (ACF y PACF). Para el análisis espacial, se elaboraron mapas temáticos de las cicatrices de fuego para los períodos de 1985-1994, 1995-2004, 2005-2014 y 2015-2024. La prueba de Shapiro-Wilk confirmó la normalidad de los datos (W = 0,9663; p = 0,274), mientras que el ANOVA no reveló diferencias significativas entre las medias decenales (F = 2,17; p = 0,108). Sin embargo, la prueba de Mann-Kendall detectó una tendencia significativa de aumento ($\tau$ = 0,2513; p = 0,0231), con un crecimiento del 73% en la media decenal. El análisis ACF/PACF reveló una dependencia temporal significativa, con autocorrelación positiva en lag 1 ($\rho_1 \approx 0,35$), indicando "memoria" del sistema. A pesar de que algunos años de mayor área quemada coincidieron con eventos

de El Niño, no se observó una diferencia estadísticamente significativa. Espacialmente, los mapas revelaron una expansión progresiva del fuego, inicialmente restringido a las sabanas (1985-1994), avanzando hacia áreas de bosque en la última década (2015-2024). Se concluye que Amapá enfrenta un escenario de intensificación del fuego, con expansión geográfica y presión sobre ecosistemas sensibles.

**Palabras clave:** Cicatrices de Fuego. Área Quemada. Series Temporales. MapBiomas Fuego. Amazonía.

## 1 INTRODUÇÃO

O estado do Amapá apresenta uma das maiores proporções de vegetação nativa preservada da Amazônia Legal, condição associada, entre outros fatores, ao amplo sistema de áreas protegidas, que abrange aproximadamente 73% de seu território (Costa et al., 2025; Gusmão; Barros; Messias, 2024). Apesar desse elevado grau de conservação, o estado está sujeito às pressões climáticas e antrópicas que vêm modificando a dinâmica do fogo na Amazônia. Nas últimas décadas, o aumento da ocorrência de secas, ondas de calor e outros eventos climáticos extremos tem favorecido condições de maior inflamabilidade da vegetação e ocorrência de incêndios na região (Pinho et al., 2025). Paralelamente, o uso do fogo associado às atividades agropecuárias e ao manejo da terra pode favorecer sua propagação para áreas naturais, ampliando os impactos ecológicos e socioeconômicos (Cabral Junior; Cyrne; Turatti, 2024).

A dinâmica do fogo no Amapá é particularmente complexa devido à heterogeneidade de suas paisagens, que incluem extensas áreas florestais e formações abertas, com diferentes respostas ao fogo. Estudos realizados no estado demonstram que fatores climáticos, características da vegetação e pressões antrópicas contribuem para determinar a distribuição espacial da propensão ao fogo, com maior suscetibilidade em áreas de savana e em zonas de transição entre formações abertas e florestais. Além disso, projeções climáticas indicam que mudanças nas condições ambientais podem modificar a distribuição das áreas propensas ao fogo no futuro (Santana et al., 2023). Em escala mais ampla, análises para a Amazônia Legal também evidenciam a importância conjunta de fatores climáticos e de uso da terra na configuração espacial do fogo e sua possível alteração sob cenários climáticos futuros (Santana et al., 2024).

O sensoriamento remoto tem ampliado a capacidade de investigar essas dinâmicas ao possibilitar o mapeamento sistemático das cicatrizes de fogo e a construção de séries históricas espacialmente explícitas. As cicatrizes representam o registro espacial das áreas atingidas pelo fogo e permitem avaliar sua extensão, distribuição, recorrência e mudanças ao longo do tempo. Entre as bases atualmente disponíveis, o MapBiomas Fogo fornece uma série anual de áreas queimadas no Brasil desde 1985, produzida a partir de imagens Landsat classificadas por redes neurais profundas, possibilitando análises de longo prazo em escala regional (Alencar et al., 2022; MapBiomas, 2025).

Embora estudos anteriores tenham avançado na compreensão da suscetibilidade ao fogo e de suas relações com fatores climáticos e antrópicos no Amapá, permanece pouco explorada a dinâmica histórica das áreas efetivamente queimadas no estado. Em particular, são necessárias análises de longo prazo que integrem a variabilidade e as tendências da área queimada às condições climáticas e à distribuição espacial e persistência das cicatrizes. Essa abordagem permite complementar estudos

baseados em suscetibilidade e projeções futuras com evidências sobre os padrões de fogo efetivamente observados ao longo das últimas décadas.

Diante dessa lacuna, este estudo teve como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal das cicatrizes de fogo no estado do Amapá entre 1985 e 2024, utilizando a série histórica da Coleção 5 do MapBiomas Fogo. Especificamente, buscou-se: (i) caracterizar a variabilidade e as tendências temporais da área queimada; (ii) identificar padrões de autocorrelação temporal; (iii) avaliar a relação entre a área queimada e as condições climáticas; e (iv) analisar a distribuição espacial e a persistência interdecenal das cicatrizes de fogo no estado.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O FOGO E SEUS EFEITOS AMBIENTAIS EM DIFERENTES ECOSSISTEMAS

O fogo é um fenômeno natural resultante de uma reação química de oxidação rápida que libera luz e calor, dependendo da combinação de três elementos fundamentais: combustível (material vegetal), comburente (oxigênio) e fonte de calor (ignição), que formam o chamado triângulo do fogo (Chandler et al.,1983). Presente em diversos ecossistemas terrestres, o fogo desempenha papéis ecológicos distintos conforme o bioma e o regime de queimas a que as comunidades vegetais estão historicamente submetidas.

Em florestas tropicais úmidas, como a Amazônia, os incêndios são particularmente danosos. Estas florestas evoluíram na ausência de regimes frequentes de fogo, resultando em espécies arbóreas que não desenvolveram adaptações morfológicas ou fisiológicas à queima, como casca espessa ou rebrota pós-fogo (Cochrane, 2003). Incêndios nestes ecossistemas são tipicamente superficiais, mas podem evoluir para queimadas de copa sob condições de seca extrema associadas a eventos como o El Niño (Brando et al., 2020). Estudos de longo prazo demonstram que mesmo incêndios de baixa intensidade causam perdas expressivas e persistentes: a mortalidade de árvores induzida pelo fogo mantém-se elevada por anos após a queima, de modo que a recuperação do estoque de carbono florestal se estende por escala decenal (Silva et al., 2018). Florestas degradadas também passam a experimentar estresse térmico mais intenso, o que realimenta sua vulnerabilidade (Cooley et al., 2025).

Nas savanas, incluindo as savanas amazônicas do Amapá, o fogo assume um papel ecológico completamente distinto. Nestes ecossistemas, o fogo é um elemento natural e historicamente recorrente, atuando como importante agente evolutivo na seleção de espécies adaptadas (Miranda et al., 2002). As queimadas nas savanas são geralmente de baixa a média intensidade, consumindo predominantemente o estrato herbáceo, mas poupando grande parte do componente lenhoso, que desenvolveu adaptações como casca espessa e rebrota pós-fogo. Este regime de fogo promove a

renovação da vegetação, estimula a rebrota de gramíneas, auxilia na ciclagem de nutrientes e mantém a biodiversidade característica (Schmidt; Eloy, 2020).

## 2.2 DINÂMICA DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS NA AMAZÔNIA LEGAL

A Amazônia Legal enfrenta uma crise crescente de incêndios florestais, majoritariamente associados a atividades antrópicas. Diferentemente de biomas como o Cerrado, onde o fogo desempenha papel ecológico em ciclos naturais, a floresta amazônica apresenta baixa resiliência a eventos de queima, sendo altamente vulnerável a danos irreversíveis (Barlow et al., 2020). Estima-se que aproximadamente 85% dos incêndios na região sejam causados por ações humanas, com destaque para queimadas destinadas à limpeza de pastagens e à expansão agrícola, que frequentemente escapam ao controle devido a condições climáticas favoráveis (Nepstad et al., 2001). Embora o Amapá apresente taxas reduzidas de desmatamento em comparação a outros estados da Amazônia Legal, a abertura de estradas e a fragmentação florestal criam condições propícias para a ocorrência de incêndios, especialmente em anos de seca severa (Aragão et al., 2018). A relação sinérgica entre desmatamento e fogo constitui um dos principais mecanismos de degradação florestal: a fragmentação do dossel contínuo reduz a umidade do sub-bosque e aumenta a inflamabilidade da vegetação, criando um ciclo de retroalimentação que amplifica os riscos de incêndios recorrentes (Aragão et al., 2018).

## 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO E DETECÇÃO DE CICATRIZES DE FOGO

O sensoriamento remoto consiste em uma tecnologia fundamental para o monitoramento ambiental, baseada na aquisição de informações sobre a superfície terrestre por meio da captação da radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos (Jensen, 2009). No contexto específico da detecção de cicatrizes de fogo, o sensoriamento remoto explora as alterações nas propriedades espectrais da vegetação e do solo provocadas pela combustão, que resultam em mudanças características na reflectância da superfície, sobretudo nas faixas do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas (Chuvieco et al., 2019).

No Brasil, o projeto MapBiomas Fogo, lançado em 2020, representou um avanço significativo ao disponibilizar a primeira coleção nacional de cicatrizes de queimadas com série histórica desde 1985, baseada no processamento de imagens Landsat com resolução de 30 metros. Esta plataforma emprega redes neurais profundas para a classificação automática de áreas queimadas, incorporando correções atmosféricas e geométricas que garantem a consistência temporal dos dados; a acurácia global do produto foi reportada em torno de 98%, com erro de omissão médio de 22% e erro de comissão médio de 13% no conjunto dos biomas brasileiros (Alencar et al., 2022).

### 2.4 ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS E AUTOCORRELAÇÃO

Séries temporais correspondem a sequências de observações ordenadas no tempo, coletadas em intervalos regulares, que permitem analisar o comportamento dinâmico de fenômenos ambientais (Morettin; Toloi, 2018). Para descrever a estrutura de dependência temporal e auxiliar na identificação de padrões, utilizam-se a Função de Autocorrelação (ACF) e a Função de Autocorrelação Parcial (PACF). A ACF mede a correlação entre a série e seus valores defasados no tempo, revelando a persistência de padrões; já a PACF isola a correlação pura entre a série e uma defasagem específica, removendo os efeitos das defasagens intermediárias (Morettin; Toloi, 2018).

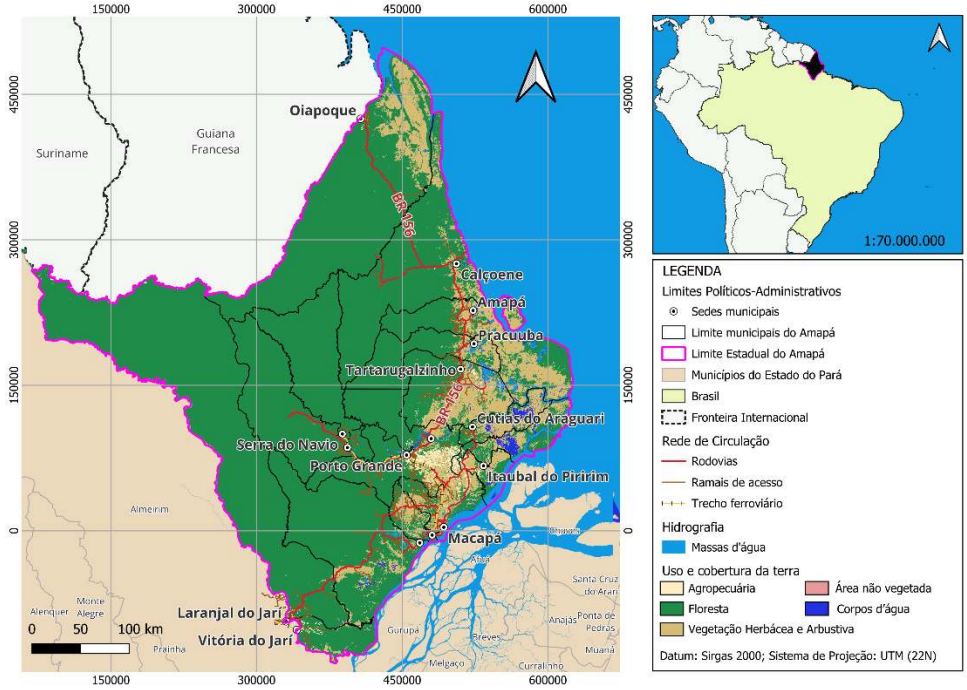
Para a detecção de tendências monotônicas em séries temporais, o teste de Mann-Kendall é um dos métodos não paramétricos mais amplamente utilizados, por sua robustez a outliers e por não exigir normalidade dos dados (Mann, 1945; Kendall, 1975). Estudos sobre queimadas na Amazônia têm utilizado este teste para detectar tendências significativas de aumento nas áreas queimadas, especialmente em anos de seca associados ao El Niño (Aragão et al., 2018; Silveira et al., 2022). Cabe registrar que a versão clássica do teste pressupõe independência serial das observações; quando a série apresenta autocorrelação positiva, a variância da estatística S é subestimada e a significância do teste tende a ser superestimada, razão pela qual foram propostas correções de variância que ajustam o teste à estrutura de dependência temporal (Hamed; Rao, 1998).

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no estado do Amapá, localizado na porção setentrional da Amazônia brasileira, entre as latitudes 4°16' N e 2°34' S e as longitudes 49°45' W e 54°45' W. O Amapá é composto por 16 municípios (IBGE, 2022) e apresenta uma das maiores proporções de áreas protegidas do Brasil (Figura 1).

Figura 1. Localização do estado do Amapá, seus limites municipais e a distribuição das classes de uso e cobertura da terra.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores, a partir de dados do IBGE (2025) e do MapBiomas (2026).

## 3.2 COLETA E PREPARAÇÃO DOS DADOS

Os dados de cicatrizes de fogo (área queimada anual em hectares) foram obtidos da Coleção 5 do MapBiomas Fogo para o período de 1985 a 2024. Esta coleção é composta por imagens do satélite Landsat com resolução espacial de 30 metros, submetidas a correções atmosféricas e geométricas, e classificadas por algoritmos de aprendizado de máquina (MapBiomas, 2025). Para a análise da influência do fenômeno El Niño, utilizou-se o Oceanic Niño Index (ONI), disponibilizado pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). O ONI é baseado nas anomalias da temperatura da superfície do mar na região Niño 3.4 e permite a classificação dos períodos de acordo com a intensidade do fenômeno. Neste estudo, foram considerados como anos de El Niño aqueles que apresentaram pelo menos cinco meses consecutivos com condições de El Niño moderado ou forte, conforme os registros do ONI (Noaa, 2024). A aplicação desse critério resultou na classificação de 11 anos como períodos de El Niño no intervalo de 1985 a 2024, enquanto os 29 anos restantes foram classificados como anos normais para fins da análise comparativa. Os anos classificados como El Niño foram posteriormente utilizados para comparar as médias anuais de área queimada com aquelas observadas nos anos normais, por meio do teste t de Student para amostras independentes. A série anual completa de área queimada utilizada nas análises é apresentada, para fins de reprodutibilidade, na Tabela 1.

## 3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

### 3.3.1 Teste de normalidade

Para verificar se os dados de área queimada atendiam ao pressuposto de normalidade, condição fundamental para a aplicação de testes paramétricos como a ANOVA, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk, 1965). A estatística do teste é calculada por:

$$w = \frac{\sum_{i=1}^{n}(a_i X_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \qquad (1)$$

Onde:

w = estatística do teste de Shapiro-Wilk

n = tamanho da amostra

$x_i$ = valores ordenados da amostra

$\bar{x}$ = média amostral

$a_i$ = coeficientes gerados a partir da distribuição normal

A hipótese nula ($H_0$) é de que os dados seguem uma distribuição normal. Valores de $p < 0,05$ levam à rejeição de $H_0$.

### 3.3.2 Comparação entre décadas

Para comparar os patamares médios de área queimada entre períodos, os dados foram segmentados em quatro períodos decadais (1985-1994, 1995-2004, 2005-2014 e 2015-2024). Esta segmentação permitiu avaliar se o nível médio da área queimada se alterou entre os períodos, o que não equivale a testar a existência de ciclos, cuja detecção demandaria métodos do domínio da frequência. Para comparar as médias de área queimada entre as quatro décadas, aplicou-se a Análise de Variância (ANOVA) unifatorial. A estatística F é calculada por:

$$F = \frac{MS_{entre}}{MS_{dentro}} = \frac{\frac{SQ_{entre}}{k-1}}{\frac{SQ_{dentro}}{n-K}} \qquad (2)$$

Onde:

F = estatística do teste ANOVA

MS_entre = quadrado médio entre os grupos

MS_dentro = quadrado médio dentro dos grupos

SQ_entre = soma dos quadrados entre os grupos

SQ_dentro = soma dos quadrados dentro dos grupos

k = número de grupos (décadas)

n = tamanho total da amostra

A hipótese nula ($H_0$) da ANOVA é de que todas as médias decadais são iguais (ausência de diferença entre os patamares decadais). Valores de $p < 0,05$ indicam significância estatística, indicando que ao menos duas médias decadais diferem entre si.

### 3.3.3 Análise de tendência temporal

Para detectar a presença de tendências monotônicas na série temporal de áreas queimadas, foi empregado o teste não paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). A estatística S é calculada por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(x_j - x_i) \qquad (3)$$

Onde:

S = estatística do teste de Mann-Kendall

n = número de observações

$x_i$, $x_j$ = valores da série temporal nos tempos i e j

sgn(z) = função sinal, definida como:

$$\text{sgn(z)} = \begin{cases} 1 \text{ se z} > 0 \\ 0 \; se \; z = 0 \\ -1 \; se \; z < 0 \end{cases} \qquad (4)$$

Valores positivos de S indicam uma tendência crescente, enquanto valores negativos indicam uma tendência decrescente. O Tau de Kendall (τ), que mede a força e a direção da associação, é dado por:

$$t = \frac{2S}{n(n-1)} \qquad (5)$$

Onde:

τ = Tau de Kendall

S = estatística do teste de Mann-Kendall

n = número de observações

O Tau de Kendall varia entre -1 e +1: $\tau > 0$ indica tendência crescente; $\tau < 0$ indica tendência decrescente; $\tau \approx 0$ indica ausência de tendência.

### 3.3.4 Análise da influência do El Niño

Para avaliar o efeito do fenômeno El Niño na ocorrência de queimadas, as médias de área queimada entre anos classificados como "El Niño" e anos "Normais" foram comparadas por meio do teste t de Student para amostras independentes (Field, 2018). A estatística t é calculada por:

$$T = \frac{\overline{x_1} - \bar{x}_2}{sp * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1^1}{n_2}}} \qquad (6)$$

Onde:

t = estatística do teste t de Student

$\bar{x}_1$ = média do grupo 1 (anos de El Niño)

$\bar{x}_2$ = média do grupo 2 (anos normais)

$n_1$ = tamanho da amostra do grupo 1

$n_2$ = tamanho da amostra do grupo 2

$s_p$ = desvio padrão agrupado, calculado por:

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2}} \qquad (7)$$

Onde:

$s_p$ = desvio padrão agrupado

$s_1^2$ = variância do grupo 1

$s_2^2$ = variância do grupo 2

### 3.3.5 Análise de autocorrelação (ACF e PACF)

Para descrever a estrutura de dependência temporal da série de áreas queimadas, foram calculadas a Função de Autocorrelação (ACF) e a Função de Autocorrelação Parcial (PACF). A ACF mede a correlação entre a série e seus valores defasados no tempo, revelando a persistência de padrões ao longo dos anos. A PACF, por sua vez, isola a correlação pura entre a série e uma defasagem específica, removendo os efeitos das defasagens intermediárias (Morettin; Toloi, 2018). A ACF para uma defasagem k é dada por:

$$p_k = \frac{Cov(Z_t, Z_{t-k})}{\sqrt{Var(Z_t) * Var\,(Z_{t-k})}} \qquad (8)$$

Onde:

$p_k$ = autocorrelação na defasagem k

$Z_t$ = valor da série no tempo t

$Z_{t-k}$= valor da série na defasagem k

Cov = covariância entre a série e sua versão defasada

Var = variância da série

A PACF é calculada a partir das equações de Yule-Walker e representa a correlação entre $Z_t$ e $Z_{t-k}$ após a remoção dos efeitos das defasagens intermediárias ($Z_{t-1}$, $Z_{t-2}$, ..., $Z_{t-k+1}$). A análise conjunta dessas funções permite identificar a presença de "memória" temporal na série, ou seja, se a área queimada em um determinado ano influencia os anos subsequentes.

### 3.4 ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DAS CICATRIZES DE FOGO

A análise espaço-temporal das cicatrizes de fogo foi realizada considerando quatro períodos decenais: 1985–1994, 1995–2004, 2005–2014 e 2015–2024. Para cada período, foi gerado um mapa binário de área queimada acumulada, no qual os pixels foram classificados como presença (1) ou ausência (0) de fogo.

Os mapas foram integrados no QGIS por meio de operações de álgebra de mapas entre rasters, permitindo distinguir áreas com ocorrência exclusiva em cada década e áreas com recorrência em duas, três ou quatro décadas. O produto resultante permitiu avaliar a distribuição espacial e a persistência interdecenal das cicatrizes de fogo ao longo dos 40 anos analisados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 NORMALIDADE DOS DADOS

Para verificar se a distribuição dos dados de área queimada atendia ao pressuposto de normalidade, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk. O resultado (W = 0,9663; p = 0,274) indicou que os dados seguem uma distribuição normal, uma vez que o p-valor (0,274) é superior ao nível de significância adotado (α = 0,05), não permitindo a rejeição da hipótese nula de normalidade. Este resultado satisfaz o pressuposto de normalidade exigido pelos testes paramétricos empregados. Cabe ressalvar, contudo, que a normalidade é condição necessária, mas não suficiente: a ANOVA e o teste

t pressupõem também independência entre as observações, pressuposto que a própria análise de autocorrelação apresentada na seção 4.4 demonstra estar violado nesta série. As implicações desse ponto são discutidas na seção de limitações. A série anual completa utilizada em todas as análises é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Série anual de área queimada (ha) no estado do Amapá entre 1985 e 2024, utilizada como base para todas as análises estatísticas apresentadas. Os valores de 1985 a 2014 e de 2016 a 2022 estão arredondados à centena de hectares, o que explica pequenas diferenças em relação às médias apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

| Ano | Área Queimada (ha) |
|---|---|
| 1985 | 83.400,0 |
| 1986 | 143.600,0 |
| 1987 | 348.400,0 |
| 1988 | 71.600,0 |
| 1989 | 19.300,0 |
| 1990 | 97.000,0 |
| 1991 | 299.600,0 |
| 1992 | 361.700,0 |
| 1993 | 124.400,0 |
| 1994 | 35.900,0 |
| 1995 | 75.600,0 |
| 1996 | 146.200,0 |
| 1997 | 254.900,0 |
| 1998 | 221.200,0 |
| 1999 | 164.600,0 |
| 2000 | 227.300,0 |
| 2001 | 448.400,0 |
| 2002 | 410.300,0 |
| 2003 | 247.400,0 |
| 2004 | 441.100,0 |
| 2005 | 295.300,0 |
| 2006 | 278.400,0 |
| 2007 | 152.800,0 |
| 2008 | 366.000,0 |
| 2009 | 408.200,0 |
| 2010 | 133.600,0 |
| 2011 | 164.700,0 |
| 2012 | 324.000,0 |
| 2013 | 192.800,0 |
| 2014 | 298.500,0 |
| 2015 | 453.558,0 |
| 2016 | 348.200,0 |
| 2017 | 239.100,0 |
| 2018 | 169.000,0 |
| 2019 | 242.500,0 |
| 2020 | 184.600,0 |
| 2021 | 158.100,0 |
| 2022 | 198.200,0 |
| 2023 | 439.586,8 |
| 2024 | 306.523,6 |

Fonte: MapBiomas Fogo - Coleção 5 (2025).

## 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE PATAMARES DECADAIS

Para comparar os patamares médios de área queimada entre períodos, os dados foram segmentados em quatro períodos decadais e submetidos à Análise de Variância (ANOVA). O resultado não indicou diferenças estatisticamente significativas entre as médias decadais ($F = 2,17$; $p = 0,108$). Este achado indica que, embora haja variações na área queimada ao longo das décadas, as médias decadais não diferem entre si de forma estatisticamente detectável, dada a elevada variabilidade intradecadal. Cabe precisar o alcance dessa conclusão: a ANOVA compara médias de grupos e não constitui, rigorosamente, um teste de ciclicidade, cuja verificação demandaria métodos do domínio da frequência, como a análise espectral ou o periodograma. O resultado deve, portanto, ser lido como ausência de diferença entre patamares decadais, e não como demonstração formal de ausência de ciclos.

Ao segmentar a série em quatro períodos decadais (Tabela 2), observa-se que a área queimada média saltou de 158.204 ha na década de 1985-1994 para 273.729 ha em 2015-2024, o que representa um crescimento de 73% ao longo de 40 anos. O incremento mais acentuado ocorreu entre a primeira e a segunda década, quando a média anual passou de 158.204 ha para 263.074 ha, um aumento de 66,3%. A partir de então, os valores estabilizaram-se em patamares elevados, com pequena retração entre 1995-2004 e 2005-2014 (-0,8%) e novo crescimento entre 2005-2014 e 2015-2024 (+4,9%). Este padrão sugere que a transição para o século XXI representou uma inflexão no regime de fogo do estado, possivelmente associada à intensificação das atividades agropecuárias e à expansão da fronteira agrícola sobre áreas de savana e florestas (Barni et al., 2015).

Tabela 2. Média de área queimada (ha) por década e variação percentual.

| Década | Média (ha) | Variação (%) |
|---|---|---|
| 1985-1994 | 158.204 | - |
| 1995-2004 | 263.074 | +66,3% |
| 2005-2014 | 260.929 | -0,8% |
| 2015-2024 | 273.729 | +4,9% |

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Embora a ANOVA não tenha indicado diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos quatro períodos decadais, a análise temporal ordenada da série, realizada pelo teste de Mann-Kendall, revelou uma tendência consistente de aumento, indicando que a dinâmica do fogo no Amapá é mais bem compreendida quando se considera a sequência temporal dos dados, e não apenas a comparação entre grupos independentes. A distribuição temporal irregular, sem periodicidade aparente, sugere que os picos de queimada observados (2001, 2004, 2015, 2023) estão mais associados a eventos climáticos episódicos e a variações na pressão antrópica do que a ciclos naturais previsíveis.

## 4.3 ANÁLISE DE TENDÊNCIA TEMPORAL

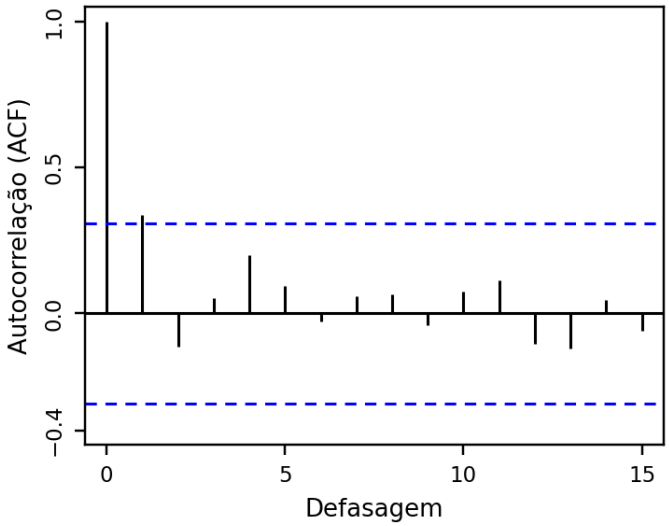
O teste de Mann-Kendall detectou uma tendência de aumento estatisticamente significativa na série temporal de áreas queimadas (Tau de Kendall = 0,2513; p = 0,0231). Trata-se de uma tendência positiva de magnitude fraca a moderada. O valor de τ corresponde à diferença normalizada entre pares concordantes e discordantes da série, e não a um percentual de concordância: um τ de 0,2513 equivale a cerca de 62,6% de pares concordantes contra 37,4% de discordantes. A magnitude do aumento, calculada pela diferença entre as médias da primeira e última década, foi de 115.525 ha em termos absolutos, representando um crescimento de 73,02% em 40 anos. O resultado do teste de Mann-Kendall indica que as cicatrizes de fogo no Amapá não se distribuem aleatoriamente, mas seguem uma trajetória consistente de aumento ao longo das quatro décadas analisadas. Esta tendência é corroborada pela recorrência espacial observada na Figura 4 e pela elevação das médias decadais (Tabela 2), padrão que também tem sido documentado para outras regiões da Amazônia em resposta à intensificação do uso do fogo e à expansão agropecuária (Aragão et al., 2018; Silveira et al., 2022). Ressalva-se que o teste foi aplicado em sua formulação clássica, que pressupõe independência serial. Como a série apresenta autocorrelação positiva significativa em defasagem 1 (seção 4.4), a significância obtida deve ser considerada um limite superior, sendo recomendável a aplicação de correção de variância para dados autocorrelacionados em análises futuras (Hamed; Rao, 1998). Deve-se ponderar, ainda, que essa trajetória não é linear: a inclinação de Sen (Sen, 1968), calculada com os dados da Tabela 1, é de cerca de 3.900 ha por ano, e o teste de Pettitt (Pettitt, 1979) aplicado à mesma série indica ponto de mudança em 2000 (p ≈ 0,02), com média de cerca de 167 mil ha até esse ano e de 288 mil ha a partir de 2001; restrita ao intervalo 1995-2024, a série não apresenta tendência monotônica significativa (τ ≈ 0,09; p ≈ 0,50). O aumento detectado reflete, portanto, sobretudo uma mudança de patamar na transição para o século XXI, coerente com a inflexão descrita na seção 4.2.

## 4.4 ANÁLISE DE AUTOCORRELAÇÃO (ACF E PACF)

A análise das funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF) da série de áreas queimadas revelou padrões característicos de dependência temporal. A ACF (Figura 2) apresentou autocorrelação positiva significativa apenas em lag 1 ($p_1 \approx 0{,}35$), ligeiramente acima do limite de confiança de 95% (±0,31), e valor não significativo em lag 2 ($p_2 \approx -0{,}12$), indicando que a área queimada em um ano está positivamente correlacionada com a do ano anterior. Este padrão sugere a presença de "memória" no sistema, onde anos de grandes queimadas tendem a ser seguidos por outros anos também com áreas elevadas, consistente com o efeito de retroalimentação positiva descrito por Brando et al. (2020) e Cochrane (2003). Ressalte-se, contudo, que parte dessa autocorrelação pode

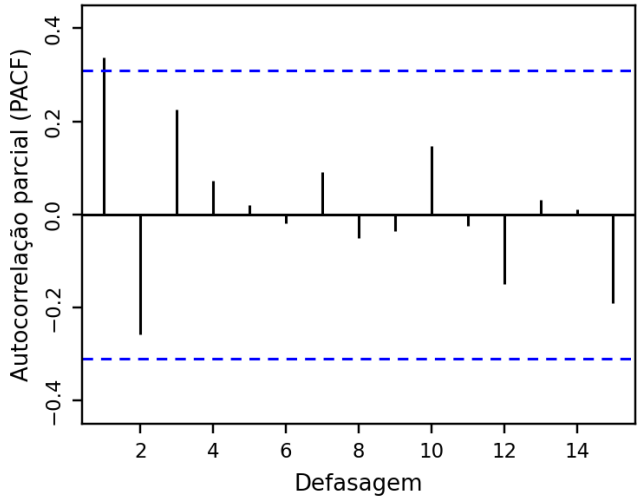
decorrer da própria mudança de patamar da série (seção 4.3), uma vez que tendências ou deslocamentos de nível não removidos induzem autocorrelação positiva nas primeiras defasagens. A PACF (Figura 3) apresentou decaimento abrupto após a primeira defasagem, com correlação parcial significativa apenas em lag 1 ($\varphi_1 \approx 0{,}35$), indicando que, após remover o efeito do ano anterior, as correlações com defasagens maiores não são significativas.

Figura 2. Função de Autocorrelação (ACF) para a série de áreas queimadas no Amapá (1985-2024).




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 3. Função de Autocorrelação Parcial (PACF) para a série de áreas queimadas no Amapá (1985-2024).




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A interpretação conjunta da ACF e PACF confirma que a série de áreas queimadas apresenta estrutura temporal não aleatória, com dependência significativa entre anos consecutivos. Este resultado complementa o teste de Mann-Kendall, que detectou tendência de aumento, ao demonstrar que a série

também possui "memória", ou seja, a área queimada em um ano tende a se associar à do ano seguinte; afirmar que as mesmas áreas voltam a queimar com maior probabilidade demandaria, contudo, análise de recorrência em nível de pixel, uma vez que a autocorrelação da série agregada não informa sobre a localização das queimadas. Este padrão é compatível com o observado em outras regiões da Amazônia, onde incêndios recorrentes degradam a vegetação e aumentam a inflamabilidade futura (Aragão et al., 2018; Brando et al., 2020). A presença de autocorrelação positiva indica que as políticas de prevenção e combate ao fogo devem considerar não apenas o ano corrente, mas também o histórico de queimadas da região, uma vez que a área queimada em um ano tende a se associar à do ano seguinte.

## 4.5 INFLUÊNCIA DO FENÔMENO EL NIÑO

A análise comparativa entre anos de El Niño (n = 11) e anos normais (n = 29) revelou que a média de área queimada em anos de El Niño (260.116 ha) é superior à média dos anos normais (230.968 ha), representando uma diferença absoluta de 29.148 ha (Tabela 3). No entanto, o teste t de Student não indicou diferença estatisticamente significativa entre os dois grupos (p = 0,483).

Tabela 3. Estatísticas comparativas entre anos de El Niño e anos normais.

| Tipo de Ano | N | Média (ha) | Mediana (ha) | DP (ha) | Mínimo (ha) |
|---|---|---|---|---|---|
| El Niño | 11 | 260.116 | 246.734 | ±110.810 | 75.490 |
| Normal | 29 | 230.968 | 197.962 | ±126.012 | 19.198 |

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

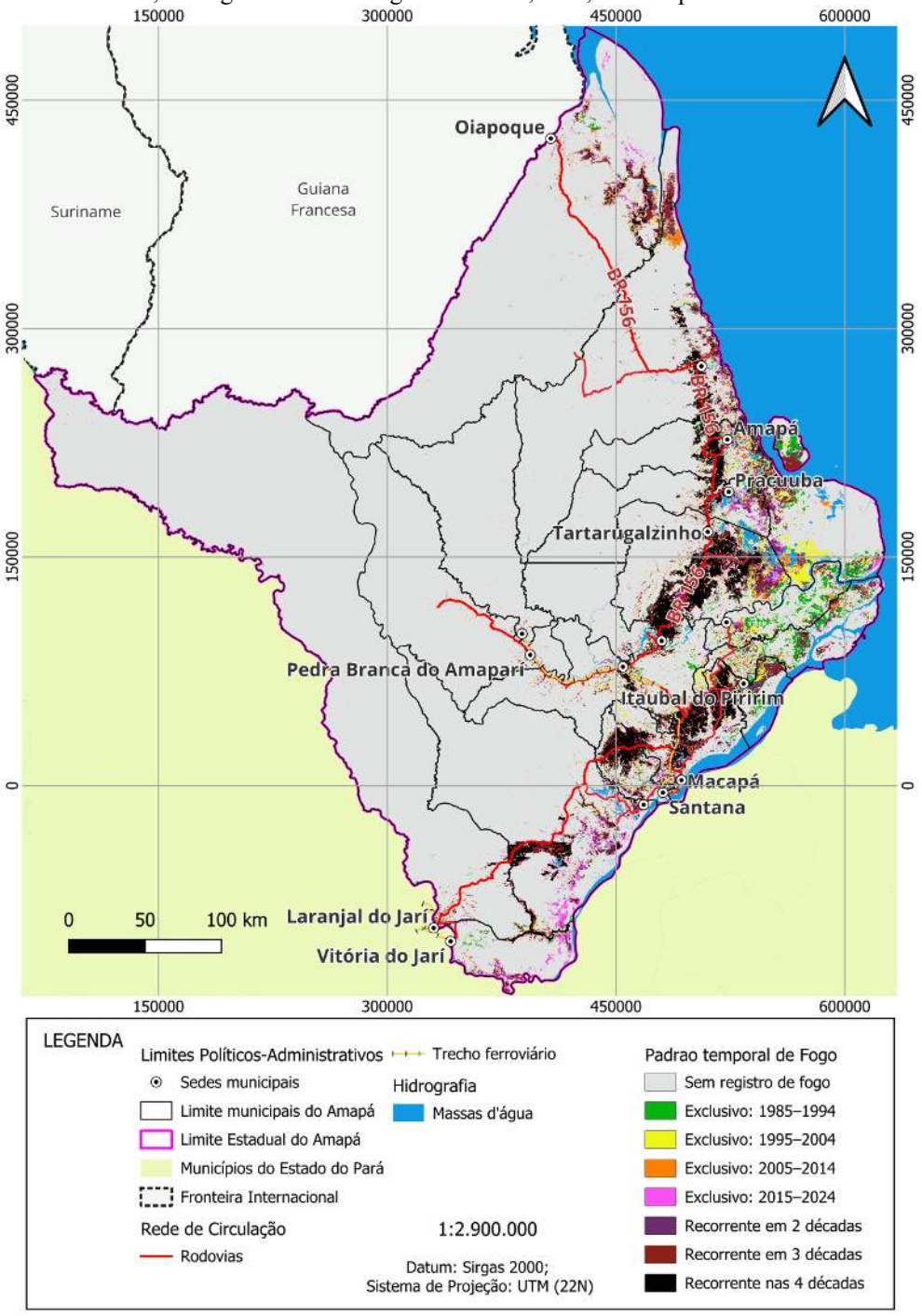
A ausência de significância estatística pode ser atribuída à elevada variabilidade intragrupo, especialmente nos anos normais, que apresentam tanto os menores (19.198 ha) quanto os maiores (453.558 ha) valores da série. Observa-se, contudo, que anos de El Niño como 2016 e 2023 coincidiram com valores elevados de área queimada, embora 1998 tenha registrado área inferior à média da série (Tabela 1), sugerindo que a relação com o fenômeno pode ser mais complexa, envolvendo a intensidade do evento, a duração da estação seca e a disponibilidade de combustível, conforme discutido por Cochrane (2003) e Brando et al. (2020). Destaca-se, ainda, que o maior valor da série (453.558 ha, em 2015) foi registrado em ano classificado como normal, embora 2015 corresponda à fase de desenvolvimento do El Niño extremo de 2015-2016, cuja seca sobre a Amazônia se iniciou ainda naquele ano (Jiménez-Muñoz et al., 2016); a classificação anual dos eventos pode, assim, alocar no grupo normal anos sob forte influência do fenômeno, o que contribui para a ausência de significância no teste t. Estudos recentes (Jiménez-Muñoz et al., 2016; Marengo et al., 2018) indicam que a influência do El Niño sobre os incêndios na Amazônia é mediada pela intensidade do evento e por condições antecedentes de seca, o que pode explicar a não linearidade observada nos dados do

Amapá. Além disso, fatores antrópicos, como a proximidade de rodovias e áreas agropecuárias, podem exercer influência preponderante sobre a ocorrência de queimadas, atenuando ou potencializando os efeitos climáticos.

## 4.6 PADRÕES ESPAÇO-TEMPORAIS DAS CICATRIZES DE FOGO

A análise integrada das cicatrizes de fogo entre 1985 e 2024 revelou uma distribuição espacial heterogênea no estado do Amapá (Figura 4). As ocorrências concentram-se principalmente nas porções leste, centro-leste e sudeste, enquanto grande parte da porção oeste apresenta ausência ou menor expressão de registros de fogo. Esse padrão acompanha a distribuição das principais formações vegetacionais do estado (Figura 1), com maior concentração das cicatrizes nas áreas classificadas pelo projeto MapBiomas (2026) como vegetação herbácea e arbustiva (também denominadas de savanas amazônicas). Em contraste, observa-se menor ocorrência de incêndios e queimadas nas extensas áreas florestais localizadas no oeste do estado do Amapá. A predominância do fogo em formações abertas é compatível com suas características estruturais, enquanto as florestas tropicais úmidas apresentam menor combustibilidade e maior sensibilidade (Cochrane, 2003; Brando et al., 2020). Esse resultado chama atenção para a heterogeneidade dos ecossistemas amazônicos e para suas distintas dinâmicas de fogo, já demonstradas na literatura por meio de modelos de distribuição baseados em nicho ecológico (Santana et al., 2023).

Figura 4. Padrões espaço-temporais e recorrência interdecenal das cicatrizes de fogo no estado do Amapá entre 1985 e 2024, distinguindo áreas atingidas em uma, duas, três ou quatro décadas.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A distribuição espacial das cicatrizes também reflete a interação entre condicionantes climáticos e antrópicos. A marcada sazonalidade climática na região centro-leste do Amapá, caracterizada pela alternância entre períodos de elevada precipitação e uma estação menos chuvosa, exerce papel importante na dinâmica do fogo, uma vez que a redução das chuvas favorece a diminuição da umidade da vegetação e aumenta a disponibilidade de material combustível. Esse componente

climático, associado às práticas de uso da terra, contribui para explicar a concentração das ocorrências em determinados períodos e setores da paisagem. A importância das condições climáticas para a dinâmica do fogo no Amapá também foi demonstrada por Santana et al. (2023), que identificaram a atuação conjunta de variáveis climáticas e antrópicas na distribuição da propensão ao fogo.

Entre os fatores antrópicos, destaca-se a proximidade das áreas agropecuárias, cuja importância para a distribuição da propensão ao fogo no Amapá foi evidenciada por Santana et al. (2023). No presente estudo, observa-se ainda concentração de cicatrizes nas proximidades da BR-156, especialmente nos setores centro-oriental e norte do estado, onde o eixo rodoviário atravessa áreas de maior ocupação e uso da terra. A relação entre atividades agropecuárias, acessibilidade e ocorrência de fogo é consistente com padrões descritos em outras regiões amazônicas, nas quais a expansão da ocupação e da infraestrutura está associada à maior incidência de incêndios (Nepstad et al., 2001; Barni et al., 2015; Aragão et al., 2018; Santana et al., 2024).

A integração das quatro décadas evidencia um padrão heterogêneo de recorrência interdecenal do fogo. Enquanto as cicatrizes exclusivas de uma única década apresentam distribuição mais fragmentada, áreas atingidas em duas, três e quatro décadas concentram-se principalmente nas porções centro-leste e sudeste do estado. A ocorrência em múltiplas décadas, entretanto, pode refletir diferentes trajetórias temporais, incluindo tanto áreas com registros mais recentes quanto setores cuja recorrência está associada predominantemente a eventos pretéritos.

Um exemplo desse padrão é observado na Estação Ecológica de Maracá-Jipioca, no litoral norte do Amapá, onde são identificadas cicatrizes correspondentes a diferentes períodos da série histórica. O histórico apresentado no Plano de Manejo Integrado do Fogo da unidade mostra que os incêndios foram mais expressivos nas primeiras décadas analisadas, seguidos por uma redução acentuada da área queimada a partir de 2007 (ICMBio, 2022). Nesse caso, a recorrência interdecenal observada espacialmente reflete principalmente o legado de eventos de fogo ocorridos no passado, evidenciando que áreas classificadas como recorrentes podem apresentar diferentes dinâmicas ao longo dos 40 anos analisados.

As áreas com ocorrência exclusiva no período de 2015–2024 merecem atenção particular por representarem setores nos quais não foram identificadas cicatrizes nas três décadas anteriores, indicando uma possível expansão recente da ocorrência do fogo no estado. Sob a perspectiva da gestão, essas áreas podem constituir setores prioritários para ações de monitoramento e prevenção, especialmente quando localizadas em ambientes sensíveis ao fogo ou próximas a áreas de ocupação antrópica. Por outro lado, áreas com recorrência interdecenal e registros no período mais recente

representam setores de ocorrência histórica do fogo que permanecem ativos, demandando estratégias continuadas de prevenção e manejo.

## 4.7 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Os resultados aqui apresentados devem ser lidos à luz de cinco limitações. A primeira, e mais relevante, é de natureza estatística: a análise de autocorrelação demonstrou dependência temporal significativa em defasagem 1 ($\rho_1 \approx 0{,}35$), o que viola o pressuposto de independência das observações exigido tanto pela ANOVA quanto pelo teste t de Student e pela formulação clássica do teste de Mann-Kendall. Em séries positivamente autocorrelacionadas, a variância das estatísticas de teste é subestimada e a probabilidade de erro tipo I aumenta, de modo que os valores de p obtidos devem ser interpretados como limites superiores da significância. A aplicação de correções de variância para autocorrelação (Hamed; Rao, 1998), de estimadores de magnitude robustos, como a inclinação de Theil-Sen (Sen, 1968), e de modelos que incorporem explicitamente a estrutura temporal, como os da classe ARIMA, constitui o desdobramento metodológico natural deste trabalho.

A segunda limitação refere-se ao tamanho amostral. Com 40 observações anuais, das quais apenas 11 classificadas como anos de El Niño, o poder estatístico para detectar diferenças entre grupos é reduzido, sobretudo diante da elevada variabilidade intragrupo observada. A ausência de significância no teste t não deve, portanto, ser interpretada como evidência de ausência de efeito do El Niño, mas como incapacidade de detectá-lo com o desenho e a amostra disponíveis.

A terceira limitação é a definição binária adotada para os anos de El Niño. O critério de pelo menos cinco meses consecutivos em condição moderada ou forte trata como equivalentes eventos de intensidades muito distintas e não considera a defasagem entre o pico do fenômeno e a estação seca regional, nem as condições antecedentes de umidade do solo. O tratamento do Oceanic Niño Index como variável contínua, com defasagens explícitas, tende a ser mais informativo.

A quarta limitação decorre do produto utilizado. A Coleção 5 do MapBiomas Fogo, derivada de imagens Landsat com resolução espacial de 30 m, apresenta erro médio de omissão da ordem de 22% (Alencar et al., 2022), tendendo a subestimar cicatrizes pequenas, fragmentadas ou de baixa severidade, além de estar sujeita a limitações de disponibilidade de imagens livres de nuvens, condição especialmente restritiva na Amazônia. As áreas reportadas não acompanham estimativas de incerteza, procedimento recomendado como boa prática em estudos de detecção de mudança.

A quinta limitação é de escopo. O estudo caracteriza a distribuição e a tendência das áreas queimadas, mas não avalia a severidade do fogo, seus efeitos sobre a estrutura e a composição da vegetação, tampouco os determinantes socioeconômicos e fundiários das ignições. A atribuição das

cicatrizes a vetores específicos, como manejo agropecuário, expansão da fronteira ou incêndios acidentais, permanece fora do alcance dos dados utilizados.

### 4.8 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

O estudo oferece três contribuições. No plano empírico, disponibiliza a primeira caracterização de longo prazo, com série anual completa de quatro décadas, das áreas efetivamente queimadas no estado do Amapá, complementando a literatura existente, majoritariamente centrada em modelos de suscetibilidade e em projeções futuras. No plano analítico, articula em um mesmo desenho a detecção de tendência, a estrutura de dependência temporal e a persistência espacial interdecenal, demonstrando que as três dimensões conduzem a conclusões convergentes sobre a intensificação do regime de fogo. No plano da gestão territorial, identifica setores com ocorrência exclusiva na década mais recente, que constituem frentes de expansão do fogo e, portanto, prioridades objetivas de monitoramento, bem como setores de recorrência histórica que demandam estratégias continuadas de manejo.

## 5 CONCLUSÃO

A análise integrada de séries temporais e espaciais permitiu um entendimento aprofundado da dinâmica do fogo no Amapá entre 1985 e 2024. Os resultados confirmam uma tendência de aumento significativo das áreas queimadas, com crescimento de 73% na média decadal (de 158.204 ha para 273.729 ha), evidenciado pelo teste de Mann-Kendall ($\tau = 0{,}2513$; $p = 0{,}0231$). Embora a ANOVA não tenha apontado diferenças significativas entre décadas, o que indica apenas que as médias decadais não diferem de forma estatisticamente detectável, a análise temporal ordenada evidenciou uma trajetória consistente de aumento, ainda que a significância obtida deva ser considerada um limite superior, dada a autocorrelação serial identificada na série.

A análise de autocorrelação (ACF e PACF) revelou que a série apresenta estrutura temporal não aleatória, com dependência significativa entre anos consecutivos ($\rho_1 \approx 0{,}35$). Esse resultado indica a existência de persistência temporal na ocorrência das áreas queimadas, sugerindo que anos com maiores extensões de cicatrizes de fogo tendem a estar associados a valores elevados nos anos subsequentes. Embora a autocorrelação, isoladamente, não permita afirmar que áreas previamente queimadas se tornam diretamente mais inflamáveis ou suscetíveis a novos incêndios, mecanismos ecológicos relacionados à recorrência do fogo e à alteração das condições da vegetação podem contribuir para essa persistência temporal, conforme discutido na literatura (Brando et al., 2020; Cochrane, 2003). A influência do El Niño, embora perceptível em alguns picos de queimada (2016 e 2023), não se mostrou estatisticamente significativa, sugerindo que outros fatores climáticos e

antrópicos podem estar envolvidos na dinâmica observada no estado, como a expansão agropecuária e a proximidade de rodovias.

O mapa de recorrência interdecenal (Figura 4) revelou núcleos de queima persistente nas savanas do centro-leste do estado, atingidos nas quatro décadas, e áreas queimadas apenas na década mais recente (2015-2024) nas bordas entre savana e floresta e na porção sul. Este avanço sobre ecossistemas florestais é particularmente preocupante, uma vez que estes ambientes não são adaptados ao fogo e apresentam baixa resiliência a eventos de queima.

Diante deste cenário, conclui-se que as estratégias de gestão do fogo no Amapá devem ser territorializadas e adaptativas. Recomenda-se a implementação do Manejo Integrado do Fogo (MIF) nas savanas, com queimadas prescritas para reduzir o acúmulo de combustível e manter a biodiversidade característica, aliada à proteção rigorosa das florestas por meio de ações preventivas acionadas por alertas climáticos sazonais, especialmente em anos previstos de El Niño. A continuidade do monitoramento espaço-temporal e o aprimoramento das análises estatísticas são fundamentais para avaliar a eficácia das políticas públicas e garantir a conservação da sociobiodiversidade amapaense frente às mudanças climáticas globais.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do edital CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 –Presente, Passado e Futuro da Biodiversidade do Semiárido: Inventários, Monitoramento, Impactos das Mudanças Climáticas e Implicações para o Uso e Conservação da Flora, Fauna e Fungos. W.J.F.R. foi apoiado por bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (processo nº 314954/2021-0), Projeto Prospecta 4.0 –CNPq (processo nº 407907/2022-0) e pelo projeto 30202010010121001 –CTBIO –FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS –CTBio-CIMATEC SERTÃO). Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (INCT IN-TREE), financiado pelo CNPq (408930/2024-1), pela CAPES (88887.195651/2025-00) e pela FAPESP. Financiamento adicional foi fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), por meio do programa Bioeconomia, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, no âmbito da Chamada nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Termo de Outorga nº PPF0003/2023. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio institucional, bem como ao SENAI CIMATEC pela contribuição no desenvolvimento científico e tecnológico

voltado à inovação aplicada.R.N.V. foi apoiado pelo INCT IN-TREE e agradece a bolsa SET-G 30202010010121001 –CTBIO –FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia doSemiárido (UEFS –CTBio-CIMATEC SERTÃO), vinculado a Projetos Especiais.

## REFERÊNCIAS

ALENCAR, A. A. C. et al. **Long-term Landsat-based monthly burned area dataset for the Brazilian biomes using deep learning**. Remote Sensing, v. 14, n. 11, art. 2510, 2022. DOI: 10.3390/rs14112510.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. **21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions**. Nature Communications, v. 9, n. 1, p. 536, 2018. DOI: 10.1038/s41467-017-02771-y.

BARLOW, J. et al. **Clarifying Amazonia's burning crisis**. Global Change Biology, v. 26, n. 2, p. 319-321, 2020. DOI: 10.1111/gcb.14872.

BARNI, P. E.; PEREIRA, V. B.; MANZI, A. O.; BARBOSA, R. I. **Deforestation and forest fires in Roraima and their relationship with phytoclimatic regions in the northern Brazilian Amazon**. Environmental Management, v. 55, n. 5, p. 1124-1138, 2015. DOI: 10.1007/s00267-015-0447-7.

BRANDO, P. M. et al. **The gathering firestorm in southern Amazonia**. Science Advances, v. 6, n. 2, art. eaay1632, 2020. DOI: 10.1126/sciadv.aay1632.

CABRAL JUNIOR, F. O.; CYRNE, C. C. S.; TURATTI, L. **As queimadas no estado do Pará, Brasil: Impactos ambientais, sociais e econômicos**. Cuadernos de Educación y Desarrollo, v. 16, n. 9, p. e5416, 2024.

CHANDLER, C.; CHENEY, P.; THOMAS, P.; TRABAUD, L.; WILLIAMS, D. **Fire in Forestry: Forest Fire Behavior and Effects**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

CHUVIECO, E. et al. **Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation**. Remote Sensing of Environment, v. 225, p. 45-64, 2019. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.013.

COCHRANE, M. A. **Fire science for rainforests**. Nature, v. 421, n. 6926, p. 913-919, 2003. DOI: 10.1038/nature01437.

COOLEY, S. S. et al. **Thermal stress in degraded forests in the Brazilian Amazon Arc of Deforestation**. Environmental Research Letters, v. 20, n. 8, 2025. DOI: 10.1088/1748-9326/adea98.

COSTA, J. D. M. et al. **Dense Forests in the Brazilian State of Amapá Store the Highest Biomass in the Amazon Basin**. Sustainability, v. 17, n. 12, 2025. DOI: 10.3390/su17125432.

FIELD, A. P. **Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics**. 5. ed. London: SAGE Publications, 2018.

GUSMÃO, L. H. A.; BARROS, L. S.; MESSIAS, C. G. **Amapá em Foco: exploração dos dados do uso e cobertura da terra nas áreas desmatadas (2008-2020)**. Geografia (Londrina), v. 33, n. 2, p. 71-90, 2024.

HAMED, K. H.; RAO, A. R. **A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data**. Journal of Hydrology, v. 204, n. 1-4, p. 182-196, 1998. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00125-X.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022: Amapá**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha Municipal Digital 2025**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html. Acesso em: 14 ago. 2026.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Plano de Manejo Integrado do Fogo da Estação Ecológica de Maracá-Jipioca**. Brasília, DF: ICMBio, 2022.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. et al. **Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016**. Scientific Reports, v. 6, p. 33130, 2016. DOI: 10.1038/srep33130.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. 4. ed. London: Charles Griffin, 1975.

MANN, H. B. **Nonparametric Tests Against Trend**. Econometrica, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945. DOI: 10.2307/1907187.

**MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas Fogo - Coleção 5: Série Anual de Mapas de Cicatrizes de Fogo do Brasil.** 2025. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/mapbiomas-fogo/. Acesso em: 14 ago. 2026.

**MAPBIOMAS.** *Projeto MapBiomas – Cobertura e Uso da Terra, resolução de 10 m, Coleção 4*. São Paulo: MapBiomas, 2026. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/downloads/mapas-para-download-geotiff/. Acesso em: 14 ago. 2026.

MARENGO, J. A. et al. **Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends**. Frontiers in Earth Science, v. 6, 2018. DOI: 10.3389/feart.2018.00228.

MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. M. C.; MIRANDA, A. C. **The Fire Factor**. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (ed.). The Cerrados of Brazil. New York: Columbia University Press, 2002. p. 51-68.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de Séries Temporais**. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

NEPSTAD, D. et al. **Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests**. Forest Ecology and Management, v. 154, n. 3, p. 395-407, 2001. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00511-4.

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Oceanic Niño Index (ONI)**. College Park: Climate Prediction Center, 2024. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 14 ago. 2026.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979. DOI: 10.2307/2346729.

PINHO, P. F. et al. **Vulnerabilities and compound risks of escalating climate disasters in the Brazilian Amazon**. Nature Communications, v. 16, n. 1, p. 11579, 2025. DOI: 10.1038/s41467-025-66603-0.

SANTANA, M. M. M.; VASCONCELOS, R. N.; MARIANO-NETO, E. **Fire propensity in Amazon savannas and rainforest and effects under future climate change**. International Journal of Wildland Fire, v. 32, n. 2, p. 149-163, 2023. DOI: 10.1071/WF21174.

SANTANA, M. M. M. et al. **Machine Learning Model Reveals Land Use and Climate's Role in Amazon Wildfires: Present and Future Scenarios**. Fire, v. 7, n. 10, p. 338, 2024. DOI: 10.3390/fire7100338.

SCHMIDT, I. B.; ELOY, L. **Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management**. Flora, v. 268, p. 151613, 2020. DOI: 10.1016/j.flora.2020.151613.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. **An analysis of variance test for normality (complete samples)**. Biometrika, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.

SILVA, C. V. J. et al. **Drought-induced Amazonian wildfires instigate a decadal-scale disruption of forest carbon dynamics**. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 373, n. 1760, art. 20180043, 2018. DOI: 10.1098/rstb.2018.0043.

SILVEIRA, M. V. F. et al. **Amazon fires in the 21st century: The year of 2020 in evidence**. Global Ecology and Biogeography, v. 31, n. 10, p. 2026-2040, 2022. DOI: 10.1111/geb.13577.