



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
TECNOLOGIA EM GESTÃO AMBIENTAL**

MONALISA BRITO OLIVEIRA SANTOS

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DOS FOCOS DE CALOR NO ECOTONO
CAATINGA DO ESTADO DO PIAUÍ**

TERESINA
2025

MONALISA BRITO OLIVEIRA SANTOS

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DOS FOCOS DE CALOR NO ECOTONO
CAATINGA DO ESTADO DO PIAUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção do
diploma do Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Piauí, Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Napoleão Andrade

TERESINA
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Santos, Monalisa Brito Oliveira

S231a Análise multitemporal dos focos de calor no ecotono caatinga do estado do Piauí / Monalisa Brito Oliveira Santos. - 2025.
46 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão Ambiental) -
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Fabrício Napoleão Andrade.

1. Sensoriamento remoto. 2. Densidade de kernel. 3. Manejo do fogo.
I. Título.

CDD - 577

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

MONALISA BRITO OLIVEIRA SANTOS

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DOS FOCOS DE CALOR NO ECOTONO
CAATINGA DO ESTADO DO PIAUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção do
diploma do Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Piauí, Campus Teresina Central.

Aprovada em: 28/11/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabrício Napoleão Andrade (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Jovan Marques Lara Junior
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Ms. Wesley Maycon Neris Batista
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Dedico este trabalho aos meus pais, amigos e mestres.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, pela força, pela oportunidade de chegar a esta etapa e por toda a proteção e luz que me guiaram ao longo desta jornada.

Ao meu esposo José Henrique dos Santos Filho, por ser meu companheiro de todas as horas, pelo amor, pela paciência e por todo o suporte e incentivo que me impulsionaram a lutar por este sonho.

Ao meu filho Luís Henrique Oliveira Santos, minha maior fortaleza e fonte de inspiração, que torna cada luta e cada conquista mais significativa. Este trabalho é dedicado, em grande parte, ao seu futuro.

À minha amada Mãe, Maria Das Neves Brito, por toda a influência positiva que exerceu sobre minha vida, pelo apoio inabalável, confiança e por todo o esforço realizado para que eu pudesse trilhar este caminho.

As minhas sobrinhas Jussiane Lima Oliveira, Vitória Maria Santos Silva e demais familiares, que sempre acreditaram no meu potencial e contribuíram de diversas formas para que este sonho se tornasse realidade.

Ao meu orientador, Professor Doutor Fabrício Napoleão Andrade, por todo o auxílio, dedicação, disponibilidade e, principalmente, por compartilhar sua expertise, que foi fundamental para a excelência técnica deste diagnóstico.

As minhas cunhadas Ana Maria dos Santos e Tania Maria dos Santos, pelo apoio e incentivo, por não me deixarem desistir.

Aos amigos e colegas que me acompanharam durante o curso por todo apoio mútuo, incentivo, e por estarem presentes, mesmo que à distância, durante os momentos mais desafiadores.

À Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí (SEMARH), pelo inestimável apoio concedido, que foi fundamental para a execução desta pesquisa com o fornecimento de dados e material técnico-informativo de extrema relevância.

Finalmente, à toda a minha família e amigos, pela compreensão, paciência e por celebrarem cada pequena vitória que pavimentou o caminho até aqui.

“Na terra há o suficiente para satisfazer as necessidades de todos, mas não para satisfazer a ganância de alguns.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

O estudo teve como objetivo analisar a variabilidade multitemporal dos focos de calor no bioma Caatinga do estado do Piauí, utilizando um recorte temporal de cinco anos (2020 a 2024). A pesquisa buscou mapear a distribuição geográfica e a sazonalidade desses eventos, correlacionando-os com fatores climáticos e socioeconômicos para identificar as áreas de maior risco no estado. A metodologia empregou uma abordagem quantitativa, exploratória e descritiva, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os dados de focos de calor foram coletados no Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/CPTEC). A análise espacial foi realizada através do Mapeamento de Hotspots por Densidade de Kernel. A análise temporal demonstrou variações na incidência de fogo, com picos expressivos nos anos de 2021 (registrando 134.578 focos de calor) e 2024, o que foi associado a períodos de estiagem mais intensos e a um maior déficit hídrico, confirmando a relação inversa entre precipitação e ocorrência de queimadas na Caatinga. A análise espacial identificou hotspots persistentes, concentrados principalmente nas mesorregiões Centro-Oeste e Sudoeste do Piauí. A região Centro-Oeste é o principal e mais recorrente hotspot, frequentemente atingindo a categoria de intensidade "Extremamente Alta" em 2020, 2021 e 2024, destacando a vulnerabilidade estrutural do bioma e a contínua pressão antrópica, provavelmente ligada à expansão agropecuária e ao manejo inadequado do solo. Foi também notada a formação de cinturões de focos de calor nas zonas de amortecimento das Unidades de Conservação, representando um risco iminente aos Parques Nacionais Serra da Capivara e Serra das Confusões. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de políticas públicas robustas e contínuas, baseadas no Manejo Integrado do Fogo (MIF). Concluiu-se que a priorização dos municípios críticos identificados (como Floriano, Canto do Buriti, Itaueira e São José do Peixe) é essencial para otimizar recursos e orientar medidas de fiscalização e ordenamento territorial, visando a preservação do bioma Caatinga frente às pressões climáticas e socioeconômicas.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; densidade de kernel; manejo do fogo.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the multitemporal variability of heat spots in the Caatinga biome of the state of Piauí, using a time frame of five years (2020 to 2024). The research sought to map the geographical distribution and seasonality of these events, correlating them with climatic and socioeconomic factors to identify areas of greatest risk in the state. The methodology employed a quantitative, exploratory, and descriptive approach, utilizing Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) techniques. Heat spot data were collected from the Fire Database (BDQueimadas) of the National Institute for Space Research (INPE/CPTEC). Spatial analysis was performed through Kernel Density Hotspot Mapping. Temporal analysis showed variations in fire incidence, with significant peaks in 2021 (recording 134,578 heat spots) and 2024, which was associated with periods of more intense drought and greater water deficit, confirming the inverse relationship between precipitation and fire occurrence in the Caatinga. Spatial analysis identified persistent hotspots, mainly concentrated in the Central-West and Southwest mesoregions of Piauí. The Central-West region is the main and most recurring hotspot, frequently reaching the "Extremely High" intensity category in 2020, 2021, and 2024, highlighting the structural vulnerability of the biome and continuous anthropic pressure, likely linked to agricultural expansion and inadequate land management. The formation of heat spot belts was also observed in the buffer zones of Conservation Units, representing an imminent risk to the Serra da Capivara and Serra das Confusões National Parks. The results obtained reinforce the need for robust and continuous public policies, based on Integrated Fire Management (IFM). It was concluded that prioritizing the identified critical municipalities (such as Floriano, Canto do Buriti, Itaueira, and São José do Peixe) is essential to optimize resources and guide inspection and territorial planning measures, aiming at the preservation of the Caatinga biome in the face of climatic and socioeconomic pressures.

Keywords: remote sensing; kernel density, fire management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Mapa do Piauí destacando municípios no bioma caatinga.....	24
Gráfico 1	- Incidência de focos de calor nos 10 principais municípios (2020–2024)	30
Figura 2	- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2020	34
Figura 3	- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2021	35
Figura 4	- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2022	36
Figura 5	- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2023	37
Figura 6	- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2024	38
Figura 7	- Análise integrada dos focos de calor no bioma caatinga no Piauí (2020–2024)	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Definição das classes e quantitativo quando gerada a densidade de Kernel no Qgis	27
Tabela 2	- Precipitação Total Anual (mm) na Estação Automática A312 de Teresina (PI) – 2020 a 2024	28
Tabela 3	- Ocorrências dos Focos de Calor entre os anos de 2020 a 2024 na Caatinga do Piauí	28
Tabela 4	- Quantitativo anual de focos de calor nos 10 municípios mais afetados do bioma caatinga (2020–2024)	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BCIM – Bases Cartográficas Contínuas do Brasil, ao Milionésimo

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INSA – Instituto Nacional do Semiárido

IPA – Instituto Agrônomo de Pernambuco

MIF – Manejo Integrado do Fogo

SEMARH – Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí

UCs – Unidades de Conservação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 O FOGO COMO ELEMENTO HISTÓRICO E ECOLÓGICO	16
2.2 O BIOMA CAATINGA E A VULNERABILIDADE	17
2.3 DINÂMICA DO FOGO NA CAATINGA	18
2.4 FOCOS DE CALOR	19
2.5.2.5 SENSORIAMENTO REMOTO NO MONITORAMENTO DE QUEIMADAS.....	21
3 MATERIAIS E MÉTODO.....	24
3.1 ÁREA DE ESTUDO	24
3.2 COLETAS E PROCESSAMENTO DE DADOS DOS FOCOS DE CALOR.....	25
3.2.1 AQUISIÇÃO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS	25
3.3 TABULAÇÕES DOS DADOS E DESENVOLVIMENTO DOS MAPAS	26
3.4 ANÁLISES ESPAÇO-TEMPORAIS	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 ANÁLISE TEMPORAL DOS FOCOS DE CALOR (2020-2024)	28
4.2 ANÁLISE ESPACIAL E IDENTIFICAÇÃO DOS HOTSPOTS	29
4.3 MAPEAMENTO DE HOTSPOTS POR DENSIDADE DE KERNEL.....	33
5 CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a utilização do fogo foi essencial para os avanços agrícolas, econômicos e sociais da civilização humana, sendo as queimadas uma forma tradicional de limpeza de áreas agrícolas e manejo de pastagens (Latuf; Da Silva Rios; Pereira, 2022). Contudo, a recorrência e a intensidade das queimadas e dos incêndios florestais têm crescido, impulsionadas por práticas de manejo de terra inadequadas, mudanças no uso do solo e alterações climáticas, atingindo diversos biomas com particularidades distintas. Enquanto ecossistemas como o Cerrado apresentam mecanismos de resiliência ao fogo, outros, como a Amazônia e a Caatinga, sofrem prejuízos de longo prazo com a sua ocorrência (Diele-Viegas *et al.*, 2022).

O bioma Caatinga impõe uma ameaça ecológica distinta, visto que suas espécies não possuem adaptações significativas aos incêndios. A escassez hídrica e a abundante biomassa seca durante a estação prolongada de estiagem tornam o bioma suscetível à ignição e à rápida propagação do fogo, resultando na mortalidade de plântulas e no comprometimento da capacidade de regeneração da vegetação. A recorrência de incêndios é um fator que contribui significativamente para os processos de degradação do solo e risco de desertificação (Souza *et al.*, 2020a).

Vários fatores convergem para criar este cenário de alto risco: os fatores climáticos (altas temperaturas, baixa umidade e seca severa) fornecem o combustível ideal, com um período crítico conhecido localmente como B-R-O-BRÓ (setembro a dezembro) (Carneiro; Albuquerque, 2019). Por sua vez, os fatores antrópicos são a causa principal, manifestada no uso tradicional e muitas vezes descontrolado do fogo no manejo da terra (pecuária extensiva e agricultura de subsistência) e na pressão pela extração de biomassa para lenha e carvão vegetal (Matos, 2023).

Além da degradação ambiental, os danos gerados pelas queimadas causam impactos socioeconômicos e de saúde pública, afetando propriedades rurais, o turismo e a vida humana, além de liberarem material particulado e gases poluentes (Setzer; Ferreira, 2022). A poluição atmosférica resultante contribui para o efeito estufa e impacta diretamente a saúde humana, elevando a incidência de doenças respiratórias na população local (Souza; Barros; Alves, 2020b). Adicionalmente, quando os incêndios são intensos, causam a perda de nutrientes essenciais do solo por volatilização e promovem a hidrofobia (repelência à água), dificultando o armazenamento hídrico, um fator limitante em uma região semiárida (Oliveira *et al.*, 2021).

Diante da gravidade e da complexidade desses impactos, o controle e a prevenção das

queimadas tornam-se essenciais. Nesse contexto, a detecção, monitoramento e análise multitemporal dos focos de calor, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, representa uma metodologia eficiente, principalmente em regiões sem meios intensivos de acompanhamento, condição que representa a situação geral do país (Batista, 2004). Embora a análise dos padrões históricos seja a melhor forma de planejar o combate (Oliveira *et al.*, 2023), a quantidade de pesquisas e dados detalhados para pequenas áreas, como municípios piauiense, ainda é escassa (RECIMA21, 2022)

Dessa forma, o objetivo do presente estudo visa apresentar informações sobre a variabilidade multitemporal dos focos de calor no bioma Caatinga do estado do Piauí, utilizando um recorte temporal dos últimos cinco anos (2020 a 2024). Esta análise histórica permitirá correlacionar os eventos com os fatores climáticos e socioeconômicos citados, destacando os municípios com as áreas de maior risco, e assim auxiliar as tomadas de decisão em âmbito técnico, científico e social para o combate e mitigação de tais fatores.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O FOGO COMO ELEMENTO HISTÓRICO E ECOLÓGICO

O domínio do fogo representa um marco fundamental na evolução humana, servindo como base para o desenvolvimento da agricultura e a gestão eficaz do território. Historicamente, o fogo tem se revelado uma ferramenta crucial para a expansão e o estabelecimento das sociedades. As queimadas, em particular, constituem uma prática milenar essencial no manejo tradicional para diversos fins, como a preparação da terra, onde a remoção da biomassa residual e a incorporação de cinzas aumentavam a fertilidade inicial do solo (Latuf; Da Silva Rios; Pereira, 2022); o controle de pragas e doenças, pois o calor atuava como um esterilizador superficial; e a renovação de pastagens, visto que o fogo promovia o crescimento de brotos mais jovens e mais palatáveis para o gado (Setzer; Ferreira, 2022). Dessa forma, a utilização controlada do fogo integrou-se aos sistemas agrícolas de subsistência, facilitando a adaptação e a permanência das populações em diversos ecossistemas.

Apesar de sua origem histórica no manejo tradicional, o fogo hoje é amplamente considerado um agente de degradação ambiental devido à sua utilização descontrolada. As práticas atuais se transformaram, principalmente em função da pressão por expansão de áreas de pastagem e agricultura extensiva e da falta de planejamento (Diele-Viegas *et al.*, 2022). O uso negligente do fogo, somado à extração de biomassa para lenha e carvão (fatores antrópicos), transforma as queimadas controladas em incêndios florestais de grandes proporções, que ultrapassam os limites de controle e intensificam a degradação, especialmente em biomas sensíveis (Matos, 2023).

Os impactos das queimadas e incêndios florestais são multifacetados, abrangendo consequências ambientais, econômicas e sociais (Setzer; Ferreira, 2022). Em primeiro lugar, ocorre a degradação do bioma e a perda de biodiversidade, pois o fogo destrói *habitats* e leva à mortalidade de espécies sensíveis, alterando a composição das comunidades vegetais e animais. A queima intensa, particularmente na Caatinga, é destrutiva ao ponto de comprometer o banco de sementes e acelerar a degradação e a desertificação (Oliveira *et al.*, 2021). Em segundo lugar, o impacto no solo é significativo; a queima provoca a volatilização de nutrientes essenciais, como o Nitrogênio, resulta na erosão do solo desprotegido e pode induzir a hidrofobia (repelência à água), dificultando criticamente a recuperação hídrica (Souza *et al.*, 2020a). Por fim, a poluição atmosférica e as mudanças climáticas são exacerbadas, uma vez que a combustão da biomassa libera grandes quantidades de material particulado e Gases de Efeito Estufa (GEE), como CO₂ e CH₄. Essa liberação contribui diretamente para o aquecimento

global e afeta a qualidade do ar, o que, por sua vez, tem um impacto direto na saúde humana ao elevar a incidência de doenças respiratórias na população (Souza; Barros; Alves, 2020b).

2.2 O BIOMA CAATINGA E A VULNERABILIDADE

A Caatinga é um bioma de relevância singular para o Brasil, sendo o único a ocupar exclusivamente o território nacional em toda a sua extensão. Abrange vastas áreas da Região Nordeste e se estende por porções do norte de Minas Gerais. O termo "Caatinga", de origem Tupi-Guarani, significa "floresta branca", uma referência ao aspecto que sua vegetação assume na estação seca, quando a maioria das espécies perde as folhas, uma estratégia vital de sobrevivência à escassez hídrica. Este bioma é classificado como uma área de clima semiárido, caracterizado pelo binômio seca-chuva, onde a precipitação é escassa (frequentemente abaixo de 750 mm anuais) e irregular, sendo superada pela alta taxa de evapotranspiração potencial. (Leal *et al.*, 2011).

Apesar da percepção popular de ser uma região de baixa diversidade, a Caatinga detém uma expressiva riqueza biológica. Sua flora, por exemplo, registra cerca de 1.500 espécies, das quais aproximadamente um quinto são endêmicas, ou seja, só ocorrem nessa área. Essas espécies desenvolveram notáveis adaptações para a limitação hídrica, como o armazenamento de água (cactos e bromélias), o rápido ciclo de vida das ervas anuais no período chuvoso e a caducifolia (perda de folhas na seca), evidenciando uma complexa dinâmica ecológica (Leal *et al.*, 2011).

Apesar de sua importância, a Caatinga enfrenta um extenso e acelerado processo de alteração e deterioração ambiental, impulsionado principalmente pelo uso insustentável dos recursos naturais. Estima-se que mais de 50% de sua área original já tenha sido alterada, com o desmatamento, o extrativismo e o manejo inadequado da terra como os principais vetores de degradação. Uma vulnerabilidade específica desse bioma reside nos prejuízos de longo prazo causados pela recorrência do fogo (Silva *et al.*, 2023).

A vulnerabilidade do Bioma Caatinga a incêndios florestais está intrinsecamente ligada à sua estratégia de sobrevivência frente à escassez hídrica, um fenômeno amplamente estudado na ecologia do semiárido. A maioria das espécies arbóreas e arbustivas da Caatinga manifesta a caducifolia, ou seja, a perda de folhas durante o longo período de seca (estiagem), como um mecanismo vital para minimizar a perda de água por transpiração (Leal *et al.*, 2011).

Contudo, essa adaptação essencial tem como consequência o acúmulo contínuo de material orgânico seco — folhas, galhos finos e cascas — sobre o solo. Essa deposição forma

uma camada de biomassa fina e altamente combustível (*fine fuel*), caracterizada pela baixa densidade e alta relação superfície/volume. Essa característica estrutural faz com que o material perca rapidamente qualquer teor de umidade residual (Miranda *et al.*, 2002). No auge da seca, quando a Caatinga atinge suas temperaturas mais elevadas e a umidade relativa do ar cai drasticamente (frequentemente abaixo de 30%), o combustível fino atinge um ponto de extrema secura, aumentando a sua volatilidade e, conseqüentemente, sua suscetibilidade à combustão.

A continuidade dessa camada de material seco sobre o solo funciona como um "rastilho" natural, que facilmente conecta pontos de ignição (antrópicos ou naturais) a vastas extensões do bioma. Esta combinação de combustível seco, disponível e contínuo é o fator primário que garante a rápida propagação de incêndios de superfície na Caatinga, especialmente no período conhecido como B-R-O-BRÓ (setembro a dezembro), transformando a adaptação ecológica da caducifolia em um crítico fator de predisposição ao fogo e de degradação ambiental (Silva *et al.*, 2023).

O resultado desse processo de degradação é a rápida perda de espécies endêmicas, a eliminação de processos ecológicos chave e, de forma mais crítica, a formação de extensos núcleos de desertificação em vários setores da região. Essa ameaça climática e ambiental exige urgência na conservação e na adoção de práticas de manejo sustentável.

De acordo com estudos sobre o Manejo Integrado do Fogo, os prejuízos do fogo mal organizado são alarmantes, abrangendo: 'perda de vegetação, destruição de habitats naturais, morte de animais, poluição do ar, intensificação do aquecimento global, degradação do solo, causando perda de fertilidade e produtividade. (Machado *et al.*, 2021).

2.3 DINÂMICA DO FOGO NA CAATINGA

A dinâmica do fogo no bioma Caatinga é um processo complexo, modulado pelas severas condições climáticas do semiárido e pelas características de sua vegetação, culminando em consequências ecológicas e socioeconômicas significativas. O comportamento do fogo na Caatinga é tipicamente de superfície, impulsionado pela queima da espessa camada de combustível fino gerada pela caducifolia. Devido à baixa altura e à descontinuidade da vegetação lenhosa, grandes incêndios de copa são menos comuns; no entanto, o fogo rápido e intenso na superfície é capaz de danificar gravemente os caules e a regeneração, além de esterilizar a camada superior do solo. Essa intensidade está intimamente ligada à estacionalidade do fogo, que segue o rigoroso ciclo hidrológico do semiárido. O pico de ocorrência de incêndios se concentra na estação seca, notadamente nos meses de setembro,

outubro e novembro (o "B-R-O-BRÓ") e, em algumas áreas, estendendo-se por dezembro (Leal *et al.*, 2011). É nesse período que a conjunção de fatores climáticos atinge seu máximo potencial para ignição. A relação entre seca prolongada (que garante o combustível seco e disponível), altas temperaturas (que pré-aquecem o material) e baixa umidade relativa do ar (que torna o combustível extremamente volátil) cria o ambiente ideal para que qualquer fonte de ignição, principalmente as de origem antrópica, resulte em um incêndio de rápida propagação (Silva *et al.*, 2023).

Os efeitos ecológicos das queimadas intensas e recorrentes no bioma são amplamente negativos. Embora o fogo possa ser um agente natural em outros ecossistemas, a alta frequência na Caatinga, impulsionada pelo manejo inadequado, leva à perda de espécies endêmicas que são intolerantes ao calor, e à eliminação da regeneração da vegetação lenhosa (Leal *et al.*, 2011). Mais criticamente, o fogo destrói a matéria orgânica superficial, expondo o solo à erosão e à lixiviação de nutrientes, o que acelera a degradação do solo e favorece a desertificação, um risco climático e ambiental crescente em vastos setores do bioma (Silva *et al.*, 2023; Miranda *et al.*, 2002).

As consequências socioeconômicas e de saúde pública são imediatas e severas. A fumaça gerada pelos incêndios contribui significativamente para a poluição do ar, intensificando doenças respiratórias, cardiovasculares e oculares nas populações urbanas e rurais (Souza; Barros; Alves, 2020b). Economicamente, o fogo leva à perda da fertilidade e da produtividade agrícola e pastoril, afetando a segurança alimentar e a renda das comunidades que dependem diretamente dos recursos naturais. A destruição da cobertura vegetal também prejudica a infiltração de água, intensificando o escoamento superficial e o assoreamento dos reservatórios hídricos, agravando a escassez de água no semiárido. Tais impactos reforçam a urgência na adoção de práticas de manejo sustentável e na educação preventiva contra o uso indiscriminado do fogo (Machado *et al.*, 2021).

2.4 FOCOS DE CALOR

Segundo a metodologia oficial, um foco de calor corresponde a uma anomalia térmica igual ou superior a 47°C registrada em área de até um quilômetro quadrado (1km²). Quando mais de dois focos aparecem dentro dessa mesma área, o conjunto passa a ser classificado como foco de fogo. Já o evento de fogo é caracterizado pela detecção contínua dessas anomalias por, no mínimo, 48 horas. Essa sistematização permite reduzir ruídos nos dados e direcionar esforços de forma mais precisa para situações de risco real.

Os focos de calor são anomalias térmicas identificadas por sensores de satélite, como os equipamentos das séries NOAA e MODIS, e amplamente disponibilizados pelo INPE, sendo os dados frequentemente acessados através de plataformas como o banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). É crucial entender que um foco de calor não representa necessariamente um incêndio florestal em si, mas sim a manifestação de calor acima do limiar da temperatura da superfície terrestre circundante. Por isso, são utilizados como um proxy para a ocorrência de queimadas e incêndios.

Esses registros indicam temperaturas acima do padrão da superfície terrestre, mas não representam, por si só, um incêndio ativo, funcionando apenas como indicadores indiretos da possível ocorrência de queimadas. Como essa relação não é direta, o Censipam desenvolveu, em 2019, uma metodologia de agrupamento de focos destinada a melhorar o acionamento das equipes de combate, permitindo o acompanhamento da continuidade e direção do fogo por meio do conceito de evento de fogo (Setzer; Ferreira, 2022).

O estado do Piauí utiliza abordagem semelhante, distinguindo focos de calor, focos de fogo e eventos de fogo, o que aprimora o processo de triagem e a tomada de decisão operacional, conforme a necessidade de monitoramento da dinâmica espacial e temporal dos focos de calor (Oliveira *et al.*, 2023)

A análise da série histórica desses focos de calor permite identificar padrões sazonais e interanuais intrinsecamente ligados a fatores climáticos e antrópicos. Em ambientes semiáridos, a concentração de focos tende a ser maior nos meses mais secos do ano, tipicamente entre setembro e dezembro na Caatinga. Isso coincide com as maiores temperaturas e menor umidade do ar, fatores que preparam o material combustível para a ignição. A relevância acadêmica reside na forte correlação entre a dinâmica espacial e temporal dos focos de calor e a atividade humana, como o uso descontrolado do fogo no manejo agropecuário e a extração de biomassa para lenha e carvão vegetal.

Segundo a literatura sobre manejo do fogo, (Machado *et al.*, 2021), existem alguns tipos de focos e queimadas. Dentre eles existem: focos de calor, um foco de calor não é necessariamente um foco de fogo ou incêndio, focos de fogo que são áreas que possuem mais de dois focos de calor em um raio de 1km² e eventos de fogo área que se apresenta detectados pelos sensores por 48h e quando este é observado entre 2 e 4 dias. Queimada é uma prática rural que utiliza o fogo de forma controlada, mas sem autorização ou acompanhamento formal e legal dos órgãos competentes. Queimada Controlada é o uso do fogo de maneira planejada, criteriosa e técnica, com autorização do órgão estadual competente (Lei Federal Nº 12651/2012). Em áreas com limites previamente definidos e com a observação e conhecimento que influenciam

diretamente na queima dos materiais. Nas queimadas controladas o fogo alcança baixas intensidades e, por isso, seus efeitos são muitos distintos de incêndios. Queimada prescrita consiste no uso do fogo autorizado, pelos órgãos competentes, em uma área de conservação ambiental, para fins ecológicos, socioculturais e de prevenção a incêndios, com a redução do combustível florestal, manejo de paisagem e preservação dos ecossistemas dependentes do fogo. Incêndio florestal consiste na ocorrência de fogo em área com vegetação, sem o devido controle ou de maneira criminosa, que se propaga livremente, com potencial de distribuição

A correlação entre o aumento de focos e variáveis meteorológicas, como a baixa precipitação e o déficit hídrico, é fundamental para a criação de índices de perigo de risco de fogo. Esses índices fornecem subsídios para o planejamento de ações preventivas e de combate. Dessa forma, os focos de calor são ferramentas de sensoriamento remoto essenciais para quantificar, mapear e compreender a pressão sobre o bioma, funcionando como um termômetro da vulnerabilidade e um indicador crucial para a gestão do risco de desertificação na região.

As projeções de Moriondo *et al.* (2006) e de Bento-Gonçalves *et al.* (2012) mostram um cenário de aumento do perigo de incêndio em situações de aumento da temperatura e maior quantidade de dias sem precipitação. Conforme Vasconcelos (2012), determinou que uma precipitação acumulada mensal inferior a 100 mm, temperatura média do ar superior a 24°C, e umidade relativa do ar inferior a 65% propícia a ocorrência de fogo. (Caúla *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2021).

Dessa forma, os focos de calor constituem importante ferramenta de sensoriamento remoto para compreender a dinâmica do fogo, avaliar a pressão antrópica sobre os biomas e subsidiar ações de prevenção e combate, além de representarem indicador relevante da vulnerabilidade ambiental e do risco de desertificação no semiárido.

2.5 SENSORIAMENTO REMOTO NO MONITORAMENTO DE QUEIMADAS

O sensoriamento remoto (SR) é fundamental para o monitoramento de queimadas e incêndios florestais, especialmente em biomas extensos e de difícil acesso, como a Caatinga. A detecção de focos de calor é realizada por meio de sensores a bordo de satélites que capturam a radiação eletromagnética emitida pela superfície da Terra.

O monitoramento de fogo baseia-se, especificamente, na medição da energia (emissividade) na porção do infravermelho termal (IV-T) do espectro eletromagnético. O fundamento é que corpos a temperaturas mais altas emitem mais energia; um incêndio ativo, ou foco de calor, possui uma temperatura muito superior à da vegetação e do solo ao redor (aproximadamente 500 K a 1.000 K, comparado aos 300 K da superfície terrestre). Para a

detecção, os sensores são projetados para medir essa anomalia térmica, utilizando bandas espectrais específicas, como o infravermelho de onda média (IV-M) (3-5 μm) e o infravermelho termal (IV-T) (10-12 μm), a fim de diferenciar a assinatura espectral do fogo da superfície circundante e de nuvens (Setzer; Ferreira, 2022). O IV-M é particularmente sensível ao calor intenso do fogo, enquanto o IV-T fornece a temperatura da superfície (MODIS, 2020).

A eficácia desse monitoramento é determinada pelas características operacionais dos satélites, notadamente a resolução temporal e a resolução espacial, que definem o que pode ser visto e em que momento (Setzer; Ferreira, 2022). A resolução temporal refere-se à frequência de revisita do satélite sobre a mesma área, sendo crucial devido à natureza dinâmica e de rápida evolução dos eventos de queimada. Consequentemente, sensores com alta resolução temporal, como os usados pelo Programa Queimadas/INPE, possibilitam múltiplas revisitas diárias, o que é essencial para a detecção em tempo quase real de novos focos. Essa capacidade permite o rastreamento rápido da progressão do incêndio e a mobilização de equipes de resposta para mitigar o dano (INPE, 2023). Em contrapartida, a resolução espacial define o tamanho da menor área (pixel) que o sensor consegue distinguir, o que, por sua vez, determina o tamanho mínimo do foco de calor detectável. Por exemplo, sensores com baixa resolução espacial (pixels maiores, como o 1 km do NOAA/AVHRR) detectam anomalias térmicas em áreas amplas, mas podem falhar ao registrar focos pequenos devido ao efeito de média do pixel (MODIS, 2020). Por outro lado, sensores com média ou alta resolução espacial (pixels menores, como 250 m a 1 km do MODIS e VIIRS) oferecem melhor detalhamento, sendo mais adequados para a detecção de focos menores e fundamentais para o mapeamento das cicatrizes de queimadas (as áreas efetivamente atingidas), fornecendo dados valiosos para a quantificação da área degradada (MODIS, 2020).

O sensoriamento remoto via satélite, portanto, apresenta potencialidades significativas para a gestão ambiental, com a principal vantagem de uma visão sinótica e abrangente que permite o monitoramento contínuo de vastas regiões, como a Caatinga e o Cerrado do Piauí (SEMARH, 2025). Essa capacidade garante a detecção rápida de novos focos (INPE, 2023) e viabiliza a análise multitemporal, gerando séries históricas cruciais para a análise de tendências de degradação e risco (Silva Júnior *et al.*, 2023; Diele-Viegas *et al.*, 2022).

Tecnicamente, a detecção de alvos sub-pixel aumenta a eficácia, permitindo a identificação do fogo mesmo que ele não preencha todo o pixel, desde que a temperatura seja alta o suficiente (Batista, 2004). Apesar dessas vantagens, a tecnologia enfrenta limitações que comprometem sua precisão e continuidade, sendo a principal delas a cobertura de nuvens, que bloqueia a radiação termal e impede a detecção de focos ativos (MODIS, 2020). Outra limitação

é o horário de passagem do satélite, pois sensores polares dependem de passagens fixas, podendo não registrar incêndios que iniciam e se extinguem no intervalo. Além disso, a interferência ambiental pode gerar falsos positivos, com superfícies naturalmente quentes (solo exposto no semiárido, por exemplo) sendo detectadas como focos de calor, exigindo a filtragem rigorosa dos dados conforme apontado por estudos locais (Oliveira *et al.*, 2023).

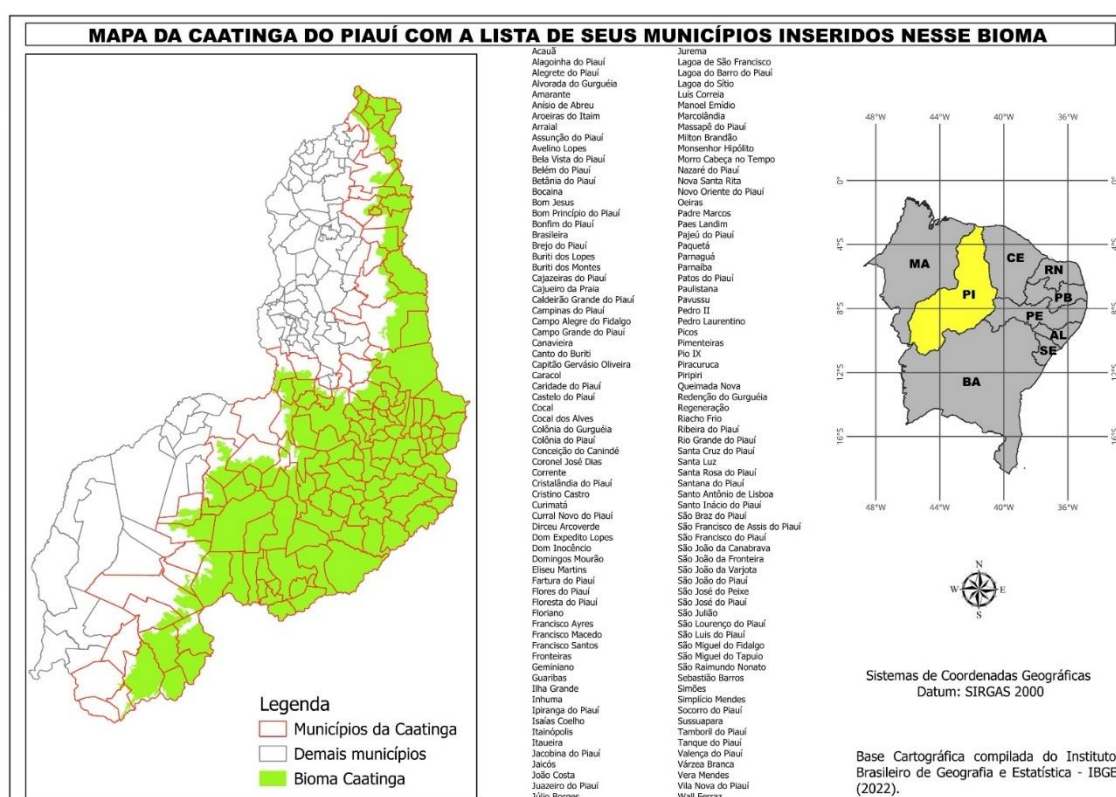
É neste contexto de notáveis potencialidades e reconhecidos desafios que o Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) se estabelece como a principal referência oficial brasileira para o monitoramento. Seu objetivo central é fornecer dados de focos de calor em tempo quase real para todo o território nacional, utilizando uma ampla gama de satélites (como AQUA/MODIS, TERRA/MODIS, NOAA/AVHRR, NPP/VIIIRS, entre outros) (INPE, 2023). A metodologia processa dados que combinam baixa resolução espacial com alta resolução temporal para gerar informações sobre a localização, intensidade e densidade dos focos. A relevância do INPE para a Caatinga e, em particular, para o Piauí é inquestionável, pois seus dados são fundamentais para a análise do impacto do fogo na região e para estudos que investigam a relação entre fatores climáticos, a sazonalidade das queimadas e sua distribuição espacial (Carneiro; Albuquerque, 2019; Silva *et al.*, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi desenvolvida nos municípios pertencentes ao ecotono Caatinga no estado do Piauí, conforme delimitação cartográfica do IBGE (Figura 1). A área estudada compreende 141 municípios, onde se analisou a dinâmica multitemporal dos focos de calor no período de 2020 a 2024.

Figura 1 - Mapa do Piauí destacando municípios no bioma caatinga.



Fonte: Adaptado de IBGE (2022).

O estudo adota abordagem quantitativa, exploratória e descritiva, utilizando o Sensoriamento Remoto como principal ferramenta para investigar a distribuição e a evolução dos focos de calor no bioma caatinga.

A metodologia consistiu na coleta, processamento e análise de dados georreferenciados de ocorrências de focos de calor, integrados em ambiente SIG para permitir a avaliação espacial e cartográfica dos padrões observados ao longo dos cinco anos analisados.

3.2 COLETAS E PROCESSAMENTO DE DADOS DOS FOCOS DE CALOR

Neste trabalho, foram utilizados dados de focos de calor localizados espacialmente no bioma caatinga do estado do Piauí. Esses dados são oriundos do Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que permite análises espaciais e temporais de focos de queimadas detectados em imagens atualizadas de satélites na América Latina. Os dados foram coletados e tabulados junto ao Centro de Geotecnologia fundiário e ambiental (CGEO) da Secretaria do meio ambiente e recursos hídricos do Piauí (SEMARH) no período de 01 a 30 de outubro de 2025.

Os dados de focos de calor utilizados nesta pesquisa foram provenientes de sensores a bordo dos satélites NOAA-20, NPP-375, AQUA_M-T, NOAA-18, NOAA-18D, NOAA-19, NOAA-19D, NOAA-20, GOES-16, TERRA_M-T, NPP-375D, AQUA_M-M, NPP-375, NPP-375D, METOB-C, METOB-B e MSG-03 entre os anos de 2020 a 2024, cujos valores de ocorrências de focos de calor no Bioma Caatinga do Piauí, para os anos observados, foram tabulados dando destaque aos 10 principais municípios com ocorrência de focos de calor nos últimos cinco anos.

O interesse principal da pesquisa está centrado nas áreas que historicamente apresentam a maior densidade de focos de calor — que são anomalias térmicas detectadas por satélite e indicadores de calor acima do normal na superfície.

3.2.1 AQUISIÇÃO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Para a análise de correlação espaço-temporal, foram utilizados dados de precipitação (pluviosidade) obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados foram extraídos da série histórica da Estação Meteorológica Automática de Teresina (A312), cobrindo o período de 2020 a 2024. A escolha desta estação se justifica por sua confiabilidade e por ser utilizada como um indicador climático (proxy) para a tendência pluviométrica regional que afeta o bioma Caatinga do Piauí. O valor de referência para a variação percentual da pluviosidade (Tabela 2) é a Média Climatológica (1991-2020) de 1.378,0 mm. Para os anos mais recentes (2023 e 2024), os totais anuais de precipitação foram obtidos mediante a compilação e soma dos Balanços Pluviométricos Mensais oficialmente divulgados pelo INMET.

3.3 TABULAÇÕES DOS DADOS E DESENVOLVIMENTO DOS MAPAS

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados o software QGIS responsável pela análise espacial, estudo da densidade de pontos e para elaboração dos mapas e o programa Excel para a tabulação de dados e geração dos gráficos.

Posteriormente utilizado a densidade de kernel, uma técnica estatística utilizada para estimar a densidade de probabilidade de uma variável aleatória, sendo especialmente útil para representar a distribuição espacial de eventos ou fenômenos, transformando dados pontuais em uma superfície contínua, permitindo uma visualização mais clara das áreas de maior concentração de eventos, calculando a densidade para cada região da área de estudo, utilizando interpolação (Kawamoto, 2012, p. 17). Segundo Câmara e Carvalho (2004, p. 5), destacam que a densidade de kernel funciona realizando uma contagem de todos os pontos dentro de uma região de influência, ponderando-os pela distância de cada um à localização de interesse, inferindo para toda a área de estudo a variação espacial da variável, mesmo nas regiões onde o processo não tenha gerado nenhuma ocorrência real, permitindo verificar, em escala global, possíveis tendência de dados, sendo uma das suas principais vantagens, a capacidade de fornecer uma representação visual intuitiva da distribuição de dados.

3.4 ANÁLISES ESPAÇO-TEMPORAIS

O componente espacial do diagnóstico foi realizado por meio da técnica de estimativa de densidade de kernel (Kernel Density Estimation). Utilizando o QGIS, sendo esse um SIG de uso gratuito, foi modelado o padrão de distribuição do conjunto dos pontos de calor georreferenciados espacialmente, utilizando-se o estimador de densidade (Kernel), proporcionando estimar uma superfície contínua por meio da interpolação dos dados amostrais dos focos de calor.

Para a execução da densidade de Kernel no QGIS, foi utilizada a ferramenta “interpolador – mapa de calor (Estimativa da Densidade de Kernel)”, sendo atribuído o valor de 100km de raio para a pesquisa de vizinhança, ou seja, a distância máxima entre os pontos, onde o resultado cartográfico final dependerá muito do valor que seja inserido neste campo, possibilitando uma visão qualitativa dos focos de calor na região de interesse da pesquisa.

Foi possível converter o conjunto de dados pontuais dos focos de calor em superfícies de calor contínuas, identificando as áreas de alta concentração de risco ("hotspots") em cinco diferentes classes de intensidade, tais como: muito baixo, baixa, média, alta e muito alta).

Os critérios utilizados para essas classes foram o número de ocorrências de focos de calor com base no raio da pesquisa de vizinhança (100 Km), transformando os dados pontuais em uma superfície contínua, permitindo uma visualização mais clara das áreas de maior concentração desses eventos, caracterizando os valores mais altos com áreas de maior concentração de focos de calor, enquanto que os valores mais baixos representam áreas com menor densidade para esses dados, baseando-se conforme descrito na Tabela abaixo (Tabela 01), conforme o quantitativo evidenciado ao gerar a densidade de Kernel na área do estudo.

Tabela 1 - Definição das classes e quantitativo quando gerada a densidade de Kernel no Qgis.

Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
$\leq 2946,14$	2946,14 a 5673,17	5673,17 a 8400,20	8400,20 a 11127,24	$> 11127,24$

Fonte: Autor, 2025.

Vale destacar que foi encontrado na literatura vários estudos que caracterizam as classes de densidade como muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, quando aplicado o estimador de Kernel, como nas pesquisas de Silva Júnior *et al.*, (2023), ao verificarem, por exemplo, a existência de áreas com densidade muito alta para a ocorrência dos focos de calor em regiões Norte e Sul, ao estudarem a área de uma Unidade de Conservação, confirmando também o uso dessa categorização na referida pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE TEMPORAL DOS FOCOS DE CALOR (2020-2024)

Os resultados obtidos a partir do diagnóstico espaço-temporal da incidência de focos de calor na região do bioma Caatinga Piauiense, empregando dados de Sensoriamento Remoto, são apresentados a seguir. Para estabelecer a correlação com as condições ambientais, os dados de focos de calor (Tabela 3) são comparados com a série histórica de precipitação anual registrada no estado (Tabela 2).

Tabela 2: Precipitação Total Anual (mm) na Estação Automática A312 de Teresina (PI) – 2020 a 2024.

Ano	2020	2021	2022	2023	2024
Precipitação Total Anual (mm)	1.714,0 mm	1.714,0 mm	1.517,8 mm	1.294,6 mm	1.473,4 mm
Variação em relação à Média (1378,0 mm)	+24,4% (Acima da média)	-19,5% (Abaixo da média)	-19,5% (Abaixo da média)	-6,1% (Próximo/Ligeiramente abaixo da média)	+6,9% (Acima da média)

Fonte: INMET

Tabela 3: Ocorrências dos Focos de Calor entre os anos de 2020 a 2024 na Caatinga do Piauí.

Ano	2020	2021	2022	2023	2024
Número de focos	74.020	134.578	70.388	85.551	72.449

Fonte: CPTEC, INPE, 2025.

A análise comparativa entre os dados de precipitação anual (Tabela 2), que utiliza a Estação de Teresina como indicador climático (proxy), e a incidência de focos de calor na Caatinga Piauiense (Tabela 3) revela uma correlação inversa forte e acentuada. O ano de 2021 é o ponto de maior contraste, pois registrou o menor volume de precipitação da série (1.111,0 mm, ou 19,5% abaixo da média climatológica), o que resultou no pico de ocorrências de focos de calor (134.578). Essa condição de seca extrema intensificou o estresse hídrico da vegetação

e acelerou a secagem da biomassa, transformando o material vegetal em combustível altamente disponível e vulnerável à ignição. Em contraste, os anos que apresentaram precipitação acima da média climatológica, como 2020 (+24,4%) e 2022 (+10,1%), registraram os menores valores de focos da série (entre 70.388 e 74.020), com a maior disponibilidade hídrica atuando como um inibidor natural da inflamabilidade. Por sua vez, o ano de 2023, com um déficit hídrico de 6,1%, apresentou um número intermediário de focos (85.551), validando a sensibilidade do bioma a pequenas flutuações no regime de chuvas, sendo a precipitação, portanto, o fator primário que controla a quantidade e a secura do material combustível, definindo a suscetibilidade da Caatinga a incêndios.

De modo geral, observa-se que a tendência dos focos de calor segue o comportamento inverso da precipitação anual, um padrão amplamente documentado na literatura sobre o semiárido. Anos secos intensificam a ocorrência de queimadas e anos úmidos diminuem esse processo. Além disso, os resultados reforçam que, embora o clima seja determinante, a atuação humana, como uso do fogo na agricultura, limpeza de pastagens e desmatamento, amplifica os impactos do regime climático e contribui para variações abruptas entre um ano e outro.

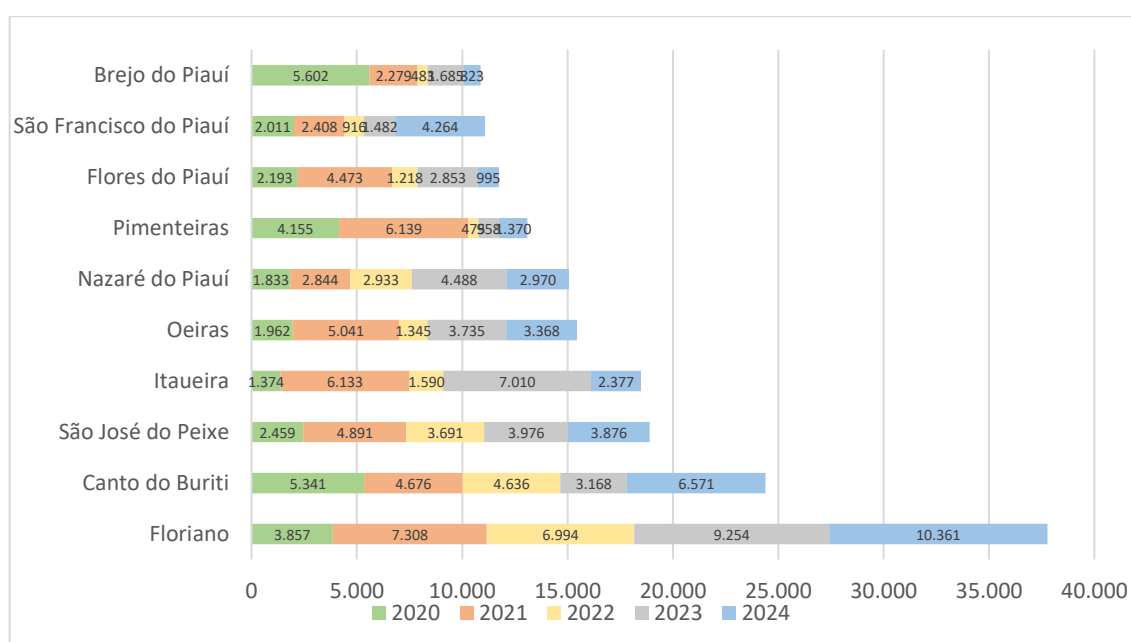
4.2 ANÁLISE ESPACIAL E IDENTIFICAÇÃO DOS HOTSPOTS

A análise da correlação temporal (Seção 4.1) demonstrou que o regime hídrico é o fator primário que dita a intensidade anual da incidência de focos de calor, sendo o déficit hídrico extremo, como o de 2021, o maior intensificador de risco. Complementarmente, a análise espacial permitiu identificar onde esse risco se materializa de forma mais crítica no bioma Caatinga Piauiense. Por meio da quantificação do número de focos de calor, foi possível constatar os dez municípios com maior número de ocorrências no período analisado (Gráfico 1).

Entre os hotspots espaciais identificados, a concentração de focos de calor é notável nos municípios de Floriano (37.774 focos de calor), Canto do Buriti (24.392 focos de calor) e São José do Peixe (18.893 focos de calor), que permaneceram consistentemente entre os dez municípios com maior incidência na série histórica. Destacam-se também Itaueira (18.484) e Oeiras (15.451). Essa concentração na região Centro-Oeste indica uma vulnerabilidade exacerbada, onde a pressão antrópica contínua (relacionada ao uso de práticas de queima na agropecuária e ao desmatamento) encontra a condição bioclimática ideal (a seca da biomassa, intensificada em anos como 2021), resultando em grandes totais acumulados de focos de calor.

A análise espacial também revelou um risco direto às áreas protegidas. Foi identificada a presença recorrente de focos de calor nas zonas de amortecimento das Unidades de Conservação. Este achado representa uma ameaça aos Parques Nacionais Serra da Capivara e Serra das Confusões. A pressão da incidência de focos nas áreas adjacentes exige um monitoramento rigoroso e ações preventivas focadas nos anos de prognóstico de seca (baseado no INMET), para evitar a propagação de incêndios para o interior das unidades, visando a preservação do seu patrimônio natural e arqueológico.

Gráfico 1: Incidência de focos de calor nos 10 principais municípios (2020–2024).



Fonte: Autor, 2025.

Ressalta-se que o município de Floriano nos anos de 2022, 2023 e 2024 foi o líder em focos de calor, sendo que no último ano apresentou 10.361 focos de calor, fato esse que pode ser explicado por ser uma região em desenvolvimento no agronegócios onde a dinâmica de uso e ocupação do solo, ou as atividades agropecuárias nessa região, têm intensificado a prática do fogo, requerendo investigação detalhada sobre a origem desses focos (seja agricultura itinerante, preparo de pastagem ou incêndios descontrolados) ou ainda por possuir alta variabilidade pluviométrica, com meses de chuvas muito elevadas seguidos por meses secos, o que reforça a hipótese de que não apenas fatores antrópicos (como uso da terra e queimadas), mas também condições meteorológicas extremas, estão associadas às concentrações persistentes de focos de calor em município como Floriano.

A persistência dos municípios de Canto do Buriti (24.392 focos) e São José do Peixe (18.893 focos) ao longo de todos os anos estudados (2020 a 2024) sinaliza a existência de fatores causais crônicos que mantêm a elevada vulnerabilidade dessas áreas. Esses municípios, ao sediarem focos constantes, devem ser prioritários em qualquer estratégia de Manejo do Fogo e fiscalização.

Os dados mostram ainda que existe variações entre os índices de focos de calor a cada ano, que se configuram em todos os anos estudados entre os 10 com maior ocorrência, conforme mostra Tabela 3.

Tabela 4- Quantitativo anual de focos de calor nos 10 municípios mais afetados do bioma caatinga (2020–2024)

ANO	MUNICÍPIOS	Focos de Calor	QUANTIDADE TOTAL DE FOCOS DE CALOR
2020	BREJO DO PIAUÍ	5.602	35.142
	CANTO DO BURITI	5.341	
	PIMENTEIRAS	4.155	
	FLORIANO	3.857	
	SANTO INÁCIO DO PIAUÍ	3.065	
	PAJEÚ DO PIAUÍ	2.914	
	PIO IX	2.844	
	BURITI DOS MONTES	2.534	
	SÃO JOSÉ DO PEIXE	2.459	
	SÃO MIGUEL DO FIDALGO	2.371	
2021	TAMBORIL DO PIAUÍ	8305	58.243
	FLORIANO	7308	
	PIMENTEIRAS	6139	
	ITAUEIRA	6133	
	MORRO CABEÇA NO TEMPO	6080	
	BURITI DOS MONTES	5197	
	OEIRAS	5041	
	SÃO JOSÉ DO PEIXE	4891	
	CANTO DO BURITI	4676	
	FLORES DO PIAUÍ	4473	
2022	FLORIANO	6994	30.455
	CANTO DO BURITI	4636	
	SÃO JOSÉ DO PEIXE	3691	
	NAZARÉ DO PIAUÍ	2933	
	JUREMA	2583	
	SANTO INÁCIO DO PIAUÍ	2427	
	PAVUSSU	2267	
	COLÔNIA DO PIAUÍ	1701	

	MORRO CABEÇA NO TEMPO ITAUEIRA	1633 1590	
2023	FLORIANO ITAUEIRA NAZARÉ DO PIAUÍ SÃO JOSÉ DO PEIXE OEIRAS SÃO MIGUEL DO TAPUIO CANTO DO BURITI FLORES DO PIAUÍ VALENÇA DO PIAUÍ PIRACURUCA	9254 7010 4488 3976 3735 3198 3168 2853 2327 1732	41.741
2024	FLORIANO CANTO DO BURITI BURITI DOS MONTES SÃO FRANCISCO DO PIAUÍ SÃO JOSÉ DO PEIXE PIRACURUCA OEIRAS NAZARÉ DO PIAUÍ SÃO MIGUEL DO TAPUIO ITAUEIRA	10361 6571 4313 4264 3876 3642 3368 2970 2941 2377	44.683

Fonte: INPE (adaptado pelo autor).

A análise da Tabela 3 reforça a elevada variabilidade interanual na intensidade do problema do fogo, mesmo entre os municípios mais críticos. O pico observado em 2021, com 58.243 focos de calor somados nos dez municípios representa 43,28% do total de focos, pode estar diretamente relacionado a fatores climáticos extremos, como períodos de seca mais prolongados e intensos que aumentam a biomassa seca e, consequentemente, a combustibilidade. Este ano também se destacou pela ocorrência extrema no município de Tamboril do Piauí, que registrou 8.305 focos de calor, sendo a maior incidência municipal isolada em todo o período analisado.

É igualmente relevante observar os municípios que apresentaram picos e desapareceram das dez maiores ocorrências. Por exemplo, Brejo do Piauí foi o principal município em 2020 (5.602 focos), mas não retornou à lista nos anos seguintes, assim como o já citado Tamboril do Piauí. Essa observação é crucial para mapear a expansão da fronteira do fogo, indicando que novos municípios se tornam pontualmente críticos devido a fatores localizados, como o avanço da fronteira agrícola ou pecuária, enquanto outros podem ter implementado medidas de controle mais rígidas ou sofrido alterações na dinâmica de uso do solo que atenuaram o problema.

O ano de 2022 e 2023, destaca-se o município de Nazaré do Piauí com números elevados de focos de calor com 2933 e 4488 focos respectivamente, situação que pode ser explicado pela proximidade do município de Floriano, sendo mesmo caso para o município de Itaueira com 7.010 focos em 2023.

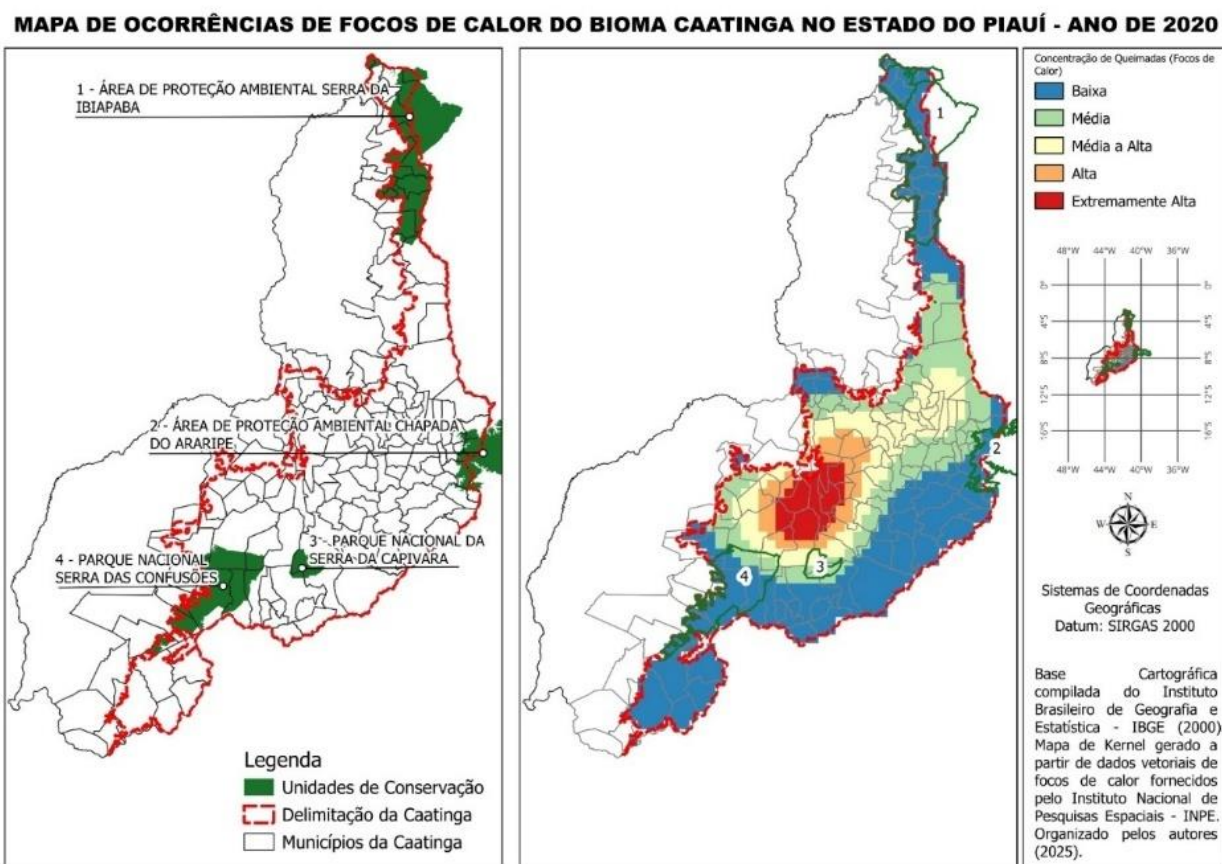
Cabe ressaltar nos anos de 2023(1.732 focos) e 2024 (3.642 focos) o município de Piracuruca-PI, posicionando-se entre as maiores ocorrências, sendo que este município nos últimos ano vem ganhando destaque na expansão agrícola e pecuária do estado do Piauí.

4.3 MAPEAMENTO DE HOTSPOTS POR DENSIDADE DE KERNEL

Conforme o conjunto de mapas de Kernel (figuras 2, 3, 4, 5 e 6) de focos de calor, gerados a partir de dados do INPE e abrangendo o período de 2020 a 2024, é fundamental para diagnosticar a pressão antrópica e o risco ambiental na Caatinga piauiense. A análise de densidade Kernel para o período 2020-2024 permitiu a identificação de hotspots persistentes, concentrados majoritariamente nas mesorregiões Sudoeste e Centro-Oeste do Piauí.

O mapa de 2020 (figura 2) revela uma distribuição heterogênea dos focos de calor na Caatinga piauiense, com concentrações moderadas a altas sobretudo na porção Centro-Oeste, abrangendo municípios como Floriano, Canto do Buriti e regiões adjacentes. Observa-se, ainda, um corredor contínuo de densidade média que se estende em direção ao sudoeste do estado. O ano apresenta menor intensidade relativa, o que sugere condições climáticas menos severas ou menor pressão antrópica em comparação aos períodos subsequentes.

Figura 2- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2020.

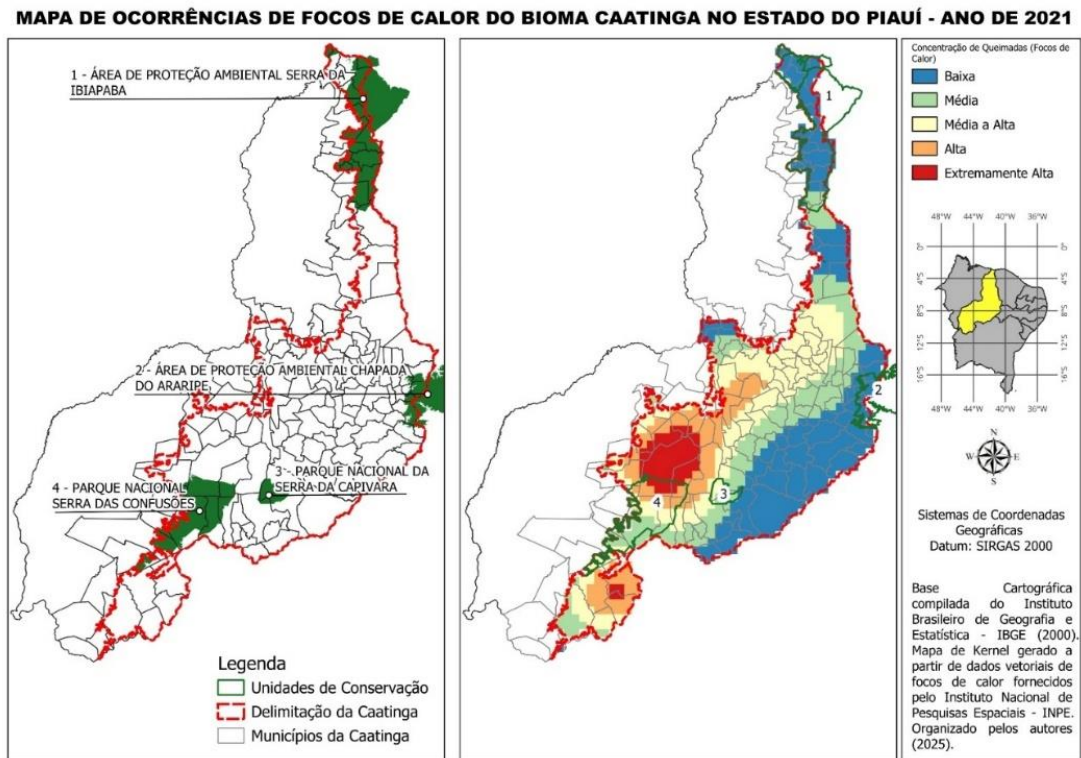


Fonte: Autor, 2025.

O ano de 2021 (figura 3) apresenta a maior intensidade de toda a série, com amplas áreas classificadas como alta e muito alta densidade. Os hotspots se expandem significativamente, abrangendo: Centro-Oeste (em sua maior extensão na série), Sudoeste e Extremo Sul e Setores mais secos do centro do estado.

A intensidade e amplitude espacial observadas indicam um ano crítico, coerente com os dados quantitativos que apontam 134.578 focos — maior registro do período. A distribuição reforça a influência de déficit hídrico acentuado e aumento da pressão agropecuária.

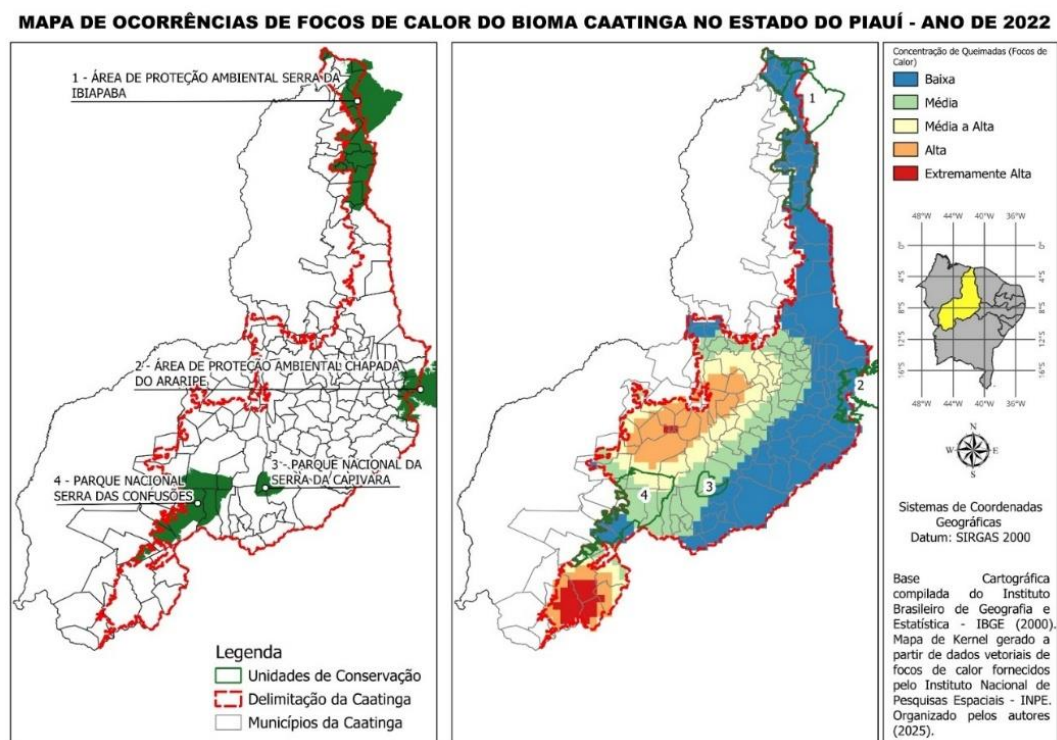
Figura 3- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2021.



Fonte: Autor, 2025.

O mapa de ocorrência de focos de calor do bioma caatinga 2022 (figura 4) apresenta redução na área de hotspots, embora alguns núcleos críticos persistam. Os focos se concentram, novamente, no Centro-Oeste (principal área recorrente), mas com menor amplitude. No Extremo Sul, aparecem aglomerados importantes, porém menos intensos que em 2021. A distribuição evidencia um cenário intermediário, refletindo um ano de pluviosidade relativamente maior e menor disponibilidade de biomassa seca.

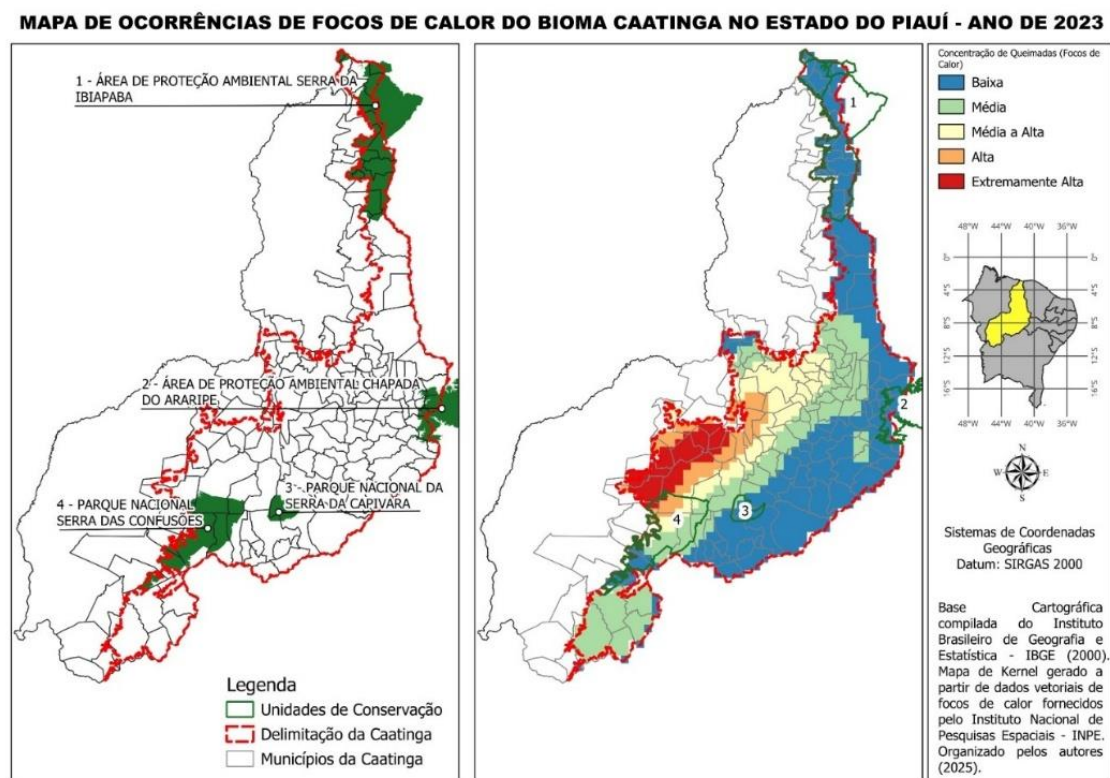
Figura 4- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2022.



Fonte: Autor, 2025.

O mapa do ano de 2023 (figura 5) mostra uma redução na intensidade dos hotspots, com retração das áreas de maior densidade quando comparado ao pico de 2021. A presença de setores classificados como “muito alta densidade” diminui, e a distribuição espacial dos focos de calor torna-se mais fragmentada. A concentração permanece no Centro-Oeste e parte do Sudoeste, mas com menor intensidade geral. Esta configuração, no entanto, ocorreu em um ano que ainda registrou déficit hídrico (6,1% abaixo da média), o que resultou em um número de focos (85.551) superior aos anos de excesso de chuva. Portanto, a redução da densidade espacial é apenas relativa e indica uma ligeira melhoria nas condições climáticas em relação à seca extrema de 2021, mas não reflete condições meteorológicas totalmente favoráveis.

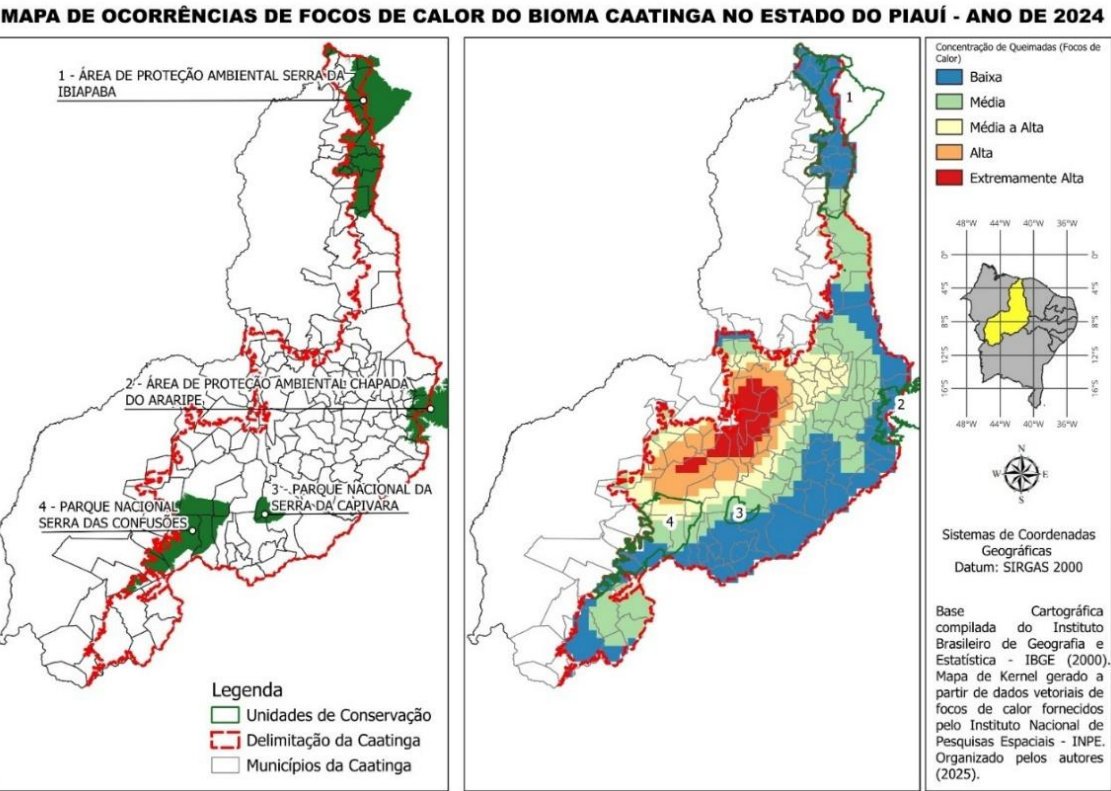
Figura 5- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2023.



Fonte: Autor, 2025.

Em 2024, observa-se um cenário de baixa intensidade geral de focos de calor, consistente com o volume de precipitação acima da média climatológica (+6,9%). Apesar do baixo total de 72.449 focos (o segundo menor da série), a análise espacial revela a persistência e a concentração de hotspots na região Centro-Oeste, atingindo classificação "muito alta" em setores de Floriano e municípios limítrofes. O mapa reflete, portanto, a baixa combustibilidade do bioma em geral devido às chuvas, mas destaca áreas onde a pressão antrópica é tão intensa que o fogo ocorre localmente (focos persistentes), mesmo sob condições climáticas desfavoráveis à sua propagação.

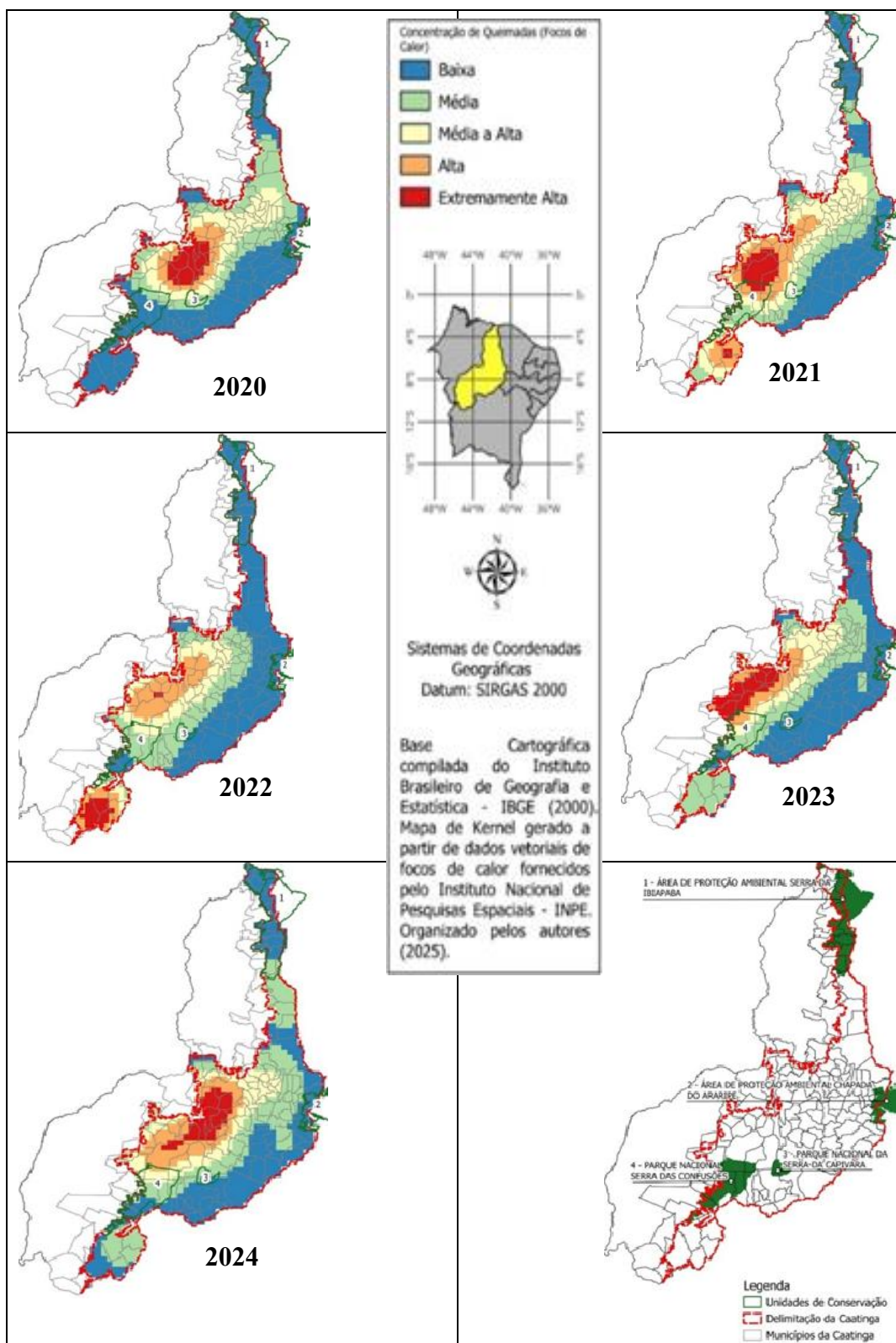
Figura 6- Mapas de ocorrência de focos de calor na caatinga do Estado do Piauí-2024.



Fonte: Autor, 2025

De forma geral, estas representações cartográficas evidenciam a distribuição, intensidade e flutuação temporal dos focos de calor, indicando as áreas de maior vulnerabilidade (figura 7).

Figura 7- Análise integrada dos focos de calor no bioma caatinga no Piauí (2020–2024).



Fonte: Autor, 2025.

A análise espacial demonstra uma concentração persistente e crítica de focos de calor, principalmente na região Centro-Oeste do estado, que constitui o principal e mais recorrente

hotspot. Esta área atingiu a categoria de intensidade Extremamente Alta de forma generalizada no ano de pico de seca (2021). A persistência dessa concentração sugere que os fatores causadores, provavelmente ligados à expansão agropecuária e ao manejo inadequado do solo, são de natureza estrutural e não apenas sazonais, exigindo ações de controle contínuas. Adicionalmente, o extremo sul do estado também se destaca em anos como 2021 e 2022, apresentando focos de alta intensidade que refletem a pressão na fronteira de uso da terra.

A análise temporal revela que a volatilidade no risco de focos de calor está primariamente ligada às condições pluviométricas. O pico de intensidade e abrangência em 2021 está diretamente conectado ao déficit hídrico de 19,5% daquele ano. A subsequente redução na ocorrência de focos em 2022 e 2024 se deve aos volumes de precipitação acima da média (Tabela 2), os quais diminuíram a combustibilidade da biomassa. O mapa de 2023 (Figura 5), embora mostre uma redução na densidade quando comparado ao pico de 2021, reflete a condição de déficit hídrico de 6,1%, que, mesmo sendo leve, resultou em um número de focos (85.551) superior aos anos de excesso de chuva. Por fim, em todos os anos, observa-se formação de cinturões de hotspots ao redor dos Parques Nacionais Serra da Capivara e Serra das Confusões e intensificação dos focos nas zonas de amortecimento. Isso representa risco real de propagação de incêndios em áreas protegidas, ameaçando biodiversidade, patrimônio cultural e estabilidade ecológica. Embora as áreas internas dos Parques Nacionais (Serra da Capivara e Serra das Confusões) demonstrem certa proteção, as elevadas densidades de focos em seus limites e zonas de amortecimento representam um risco iminente de propagação, comprometendo a integridade das áreas protegidas. Desta forma, os mapas servem como um alerta geoespacial crucial para a priorização de políticas públicas de fiscalização, prevenção e combate ao foco de calor na Caatinga do Piauí.

5 CONCLUSÃO

A análise multitemporal dos focos de calor na Caatinga piauiense, utilizando Sensoriamento Remoto, diagnosticou a dinâmica espaço-temporal do fogo, identificando Floriano, Canto do Buriti, São José do Peixe, Itaueira e Piracuruca como municípios críticos. A análise temporal revelou uma forte correlação inversa entre o regime de chuvas e a incidência de focos de calor: a umidade da biomassa atua como inibidora natural do fogo. O pico de vulnerabilidade ocorreu em 2021, que registrou um déficit pluviométrico de 19,5% (em relação à média de 1.378,0 mm) e, consequentemente, o pico de ocorrências de fogo (134.578 focos). Em contraste, anos com chuvas acima da média (2020, 2022 e 2024) registraram os menores totais de focos.

A análise espacial identificou hotspots persistentes na região Centro-Oeste, refletindo a vulnerabilidade estrutural e a pressão antrópica. A presença recorrente de focos nas zonas de amortecimento de Unidades de Conservação (Parques Nacionais Serra da Capivara e Serra das Confusões) exige atenção urgente. Os resultados reforçam a necessidade de políticas públicas robustas baseadas no Manejo Integrado do Fogo (MIF). A principal estratégia preventiva sugerida é usar o monitoramento da precipitação do INMET como principal indicador de risco, permitindo a antecipação de ações nos anos de prognóstico de seca extrema. A priorização dos municípios críticos e a ação integrada entre órgãos ambientais, comunidades e gestores são essenciais para preservar o bioma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEE, J. K. **Fire ecology of Pacific Northwest forests**. Washington, DC: Island Press, 1996. 493 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Série histórica de dados hidrometeorológicos**. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 15 out. 2025.

ALVES, R. S. et al. Análise do risco de fogo para o bioma Caatinga. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 32, n. 19, p. 734–759, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rbclima.v32i19.82470>. Acesso em: 16 out. 2025.

BATISTA, A. C. Detecção de incêndios florestais por satélites. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 2, p. 275–285, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rf.v34i2.2131>. Acesso em: 16 out. 2025.

BENTO-GONÇALVES, A. et al. Mudanças climáticas e risco de incêndio florestal no AVE (noroeste de Portugal). **Revista Geonorte**, v. 1, n. 4, p. 830–842, 2012. Disponível em: <https://rep-dspace.uminho.pt/bitstreams/c51dd3ef-dbb3-4548-b0a0-60317975af6d/download>. Acesso em: 17 out. 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Bases cartográficas contínuas do Brasil ao milionésimo: BCIM**. Versão 2020. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 10 nov. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 17 out. 2025.

BRASIL. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). Resolução Condel/SUDENE nº 176, de 3 de janeiro de 2024. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, ed. 17, seção 1, p. 1, 23 jan. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/hierarquia/resolucoes-conselho-deliberativo/resolucao-condel-sudene-no-176-de-3-de-janeiro-de-2024>. Acesso em: 5 nov. 2025.

CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília, DF: Embrapa, 2004. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap5-estatistica-espacial.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.

CARNEIRO, K. F. S.; ALBUQUERQUE, E. L. S. Análise multitemporal dos focos de queimadas em Teresina, estado do Piauí. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 5, n. 2, p. 31–40, 2019. Disponível em: <https://www.periodicos.ufpe.br/revistas/revistageonordeste/article/view/245802>. Acesso em: 18 out. 2025.

CAÚLA, R. H. et al. Overview of fire foci causes and locations in Brazil based on meteorological satellite data from 1998 to 2011. **Environmental Earth Sciences**, New York,

v. 74, n. 2, p. 1497–1508, 2015. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-4122-8>. Acesso em: 19 out. 2025.

COSTA, A. C. B.; SILVA, T. F. Estabilidade de agregados do solo em áreas da Caatinga sob diferentes usos e intensidades de fogo. **Scientia Plena**, João Pessoa, PB, v. 18, n. 6, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.14808/sp.v18i6.14175>. Acesso em: 20 out. 2025.

DIELE-VIEGAS, L. M. et al. The future of fire in Brazil: vulnerability of biomes to changes in climate and land use. **PeerJ Life & Environment**, [S. l.], v. 10, e14371, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj.14371>. Acesso em: 20 out. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Degradação de pastagens na Caatinga: fatores e estratégias de recuperação**. Petrolina, PE: EMBRAPA, 2017. Disponível em:
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1077755/1/CircularTecnica236.pdf>. Acesso em: 21 out. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Fragilidade dos solos da Caatinga e risco de desertificação**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2022. Disponível em:
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149491/1/CircularTecnica198.pdf>. Acesso em: 21 out. 2025.

FRANCISCO, P. R. M. et al. **Bioma Caatinga e degradação: modelo de mapeamento**. 1. ed. Campina Grande: EPGRAF, 2020.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Dados geográficos de unidades de conservação federais (Shapefiles)**. Brasília, DF: ICMBio, 2024. Disponível em: <https://icmbio.gov.br/portal/geoprocessamento/32-mapas>. Acesso em: 29 out. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Balancos e Dados Históricos**. Brasília, DF: Ministério da Agricultura e Pecuária. Disponível em: <http://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 2 dez. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Programa Queimadas**. Disponível em: <https://terrabilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>. Acesso em: 3 nov. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Programa Queimadas: banco de dados de queimadas e incêndios**. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <http://queimadas.dgi.inpe.br>. Acesso em: 27 out. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA). **Delimitação Semiárido Piauiense (2024)**. Campina Grande: INSA/MCTI, 2024. 1 mapa. Disponível em:
<https://www.gov.br/insa/assuntos/semiarido-brasileiro>. Acesso em: 5 nov. 2025.

KAWAMOTO, L. E. **Análise de técnicas de distribuição espacial com padrões pontuais e aplicação a dados de acidentes de trânsito e a dados de dengue de Rio Claro – SP**. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas,

Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/100063>. Acesso em: 10 dez. 2025.

LATUF, M.; RIOS, G. da S.; PEREIRA, R. C. Análise multitemporal de incêndios florestais ocorridos no estado de Minas Gerais entre 2001 e 2020. **Revista Cerrados**, v. 20, n. 1, p. 120–148, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.48075/rc.v20i1.29653>. Acesso em: 24 out. 2025.

LEAL, I. R. et al. **Ecologia e conservação da Caatinga: o semiárido brasileiro**. 2. ed. Recife: Editora Universitária UFPE, 2011.

MACHADO, R. B.; ALENCAR, A. A. C.; FONSECA, L. M. V.; COLARES, B. G. C. **Manejo Integrado do Fogo: uma alternativa para a prevenção de incêndios florestais no Cerrado e na Caatinga**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 25 p. (Documentos, 360). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1138258/manejo-integrado-do-fogo-uma-alternativa-para-a-prevencao-de-incendios-florestais-no-cerrado-e-na-caatinga>. Acesso em: 10 nov. 2025.

MAPBIOMAS. **Coleção 8 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil (1985-2022)**. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 26 out. 2025.

MATOS, H. S. **Quando a Caatinga pega fogo: incêndios na vegetação e a política pública de uso do fogo no Ceará de 2002 a 2022**. 2023. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/71336>. Acesso em: 25 out. 2025.

MIRANDA, S. P.; VIANA, P. R. P.; MIRANDA, M. C. S. Propriedades da biomassa de espécies nativas do semiárido brasileiro para uso energético. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1823–1829, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001200018>. Acesso em: 25 out. 2025.

MODIS – MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER. **MODIS Collection 6 Active Fire Product User Guide**. NASA, 2020. Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/mod14.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

MORIONDO, M. et al. Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. **Climate Research**, [S. l.], v. 31, n. 1, p. 85–95, 2006. DOI: 10.3354/cr031085. Disponível em: <https://www.int-res.com/articles/cr2006/31/c031p085.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.

OLIVEIRA, J. N.; SILVA, C. C. M.; SANTOS, F. E. C.; SILVA, J. A. R.; LEANDRO, W. M.; SOUZA, V. C. S. Análise da Dinâmica Espacial e Temporal dos Focos de Calor e sua Relação com a Pluviosidade na Caatinga no Estado do Piauí. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 14, n. 8, p. 770-781, 2023. Disponível em: <https://ricac.com.br/index.php/ricac/article/view/1004>. Acesso em: 10 nov. 2025.

OLIVEIRA, J. S. et al. Fire in the Brazilian Caatinga: a review of the consequences of fire on its biodiversity and ecosystem services. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 81, n. 4,

p. 1095–1108, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.227461>. Acesso em: 30 out. 2025.

PIAUÍ. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH). **Portal geográfico do Piauí: base de dados vetoriais de focos de calor e UCs**. Teresina, PI: SEMARH, 2025. Disponível em: <https://www.semarh.pi.gov.br/portal-geografico-semarh-pi>. Acesso em: 28 out. 2025.

RECIMA21. Monitoramento da seca e focos de calor no Semiárido Piauiense em 2022. **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, Goiânia, v. 3, n. 7, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v3i7.2177>. Acesso em: 1 nov. 2025.

SANTOS, I. R. A.; MELO, C. V. S.; PAZ, K. J. M.; REZENDE, J. P. Degradação Ambiental e Uso e Ocupação do Solo na Caatinga. **Revista Desafios**, v. 6, n. 4, p. 116-126, 2019. Disponível em: <https://revista.unitins.br/index.php/desafios/article/view/1785>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SANTOS, J. B.; PEREIRA, R. M. Impactos ambientais e sociais das queimadas no Bioma Caatinga. **Revista Brasileira de Estudos Ambientais**, v. 2, n. 3, 2020. Disponível em: <https://www.ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbea/article/view/1004>. Acesso em: 1 nov. 2025.

SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. (Ed.). **Queimadas e incêndios florestais: monitoramento orbital**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

SILVA JÚNIOR, A. R. et al. Desmatamento, incêndios florestais e secas extremas no bioma Caatinga, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 16, n. 3, p. 1932–1953, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1932-1953>. Acesso em: 2 nov. 2025.

SILVA, E. M. S.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; CORREIA FILHO, W. L. F. Espaço-temporalidade dos focos de calor na Região Metropolitana de Maceió. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 35, n. spe, p. 1029–1043, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-778635S30005>. Acesso em: 3 nov. 2025.

SILVA, F. A. et al. Condicionantes climáticos da ocorrência de incêndios em ambientes semiáridos do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 411–423, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863630026>. Acesso em: 4 nov. 2025.

SILVA, R. R. B et al. Focos de calor e as ocorrências de incêndios florestais no bioma Caatinga: uma análise da degradação ambiental. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 308–323, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/RPC2179-6858.2023.004.0028>. Acesso em: 4 nov. 2025.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Manejo integrado do fogo em ecossistemas brasileiros**. Curitiba: FUPEF, 2017.

SOUZA, B. G. P. et al. Fogo na Caatinga: o que sabemos e o que precisamos saber. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 2, e20180425, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8088.20180425>. Acesso em: 6 nov. 2025.

SOUZA, C. M. L.; BARROS, M. R. M.; ALVES, R. T. Queimadas e saúde humana no Nordeste do Brasil: uma revisão integrativa. **Revista de Enfermagem UFPE Online**, Recife, v. 14, e244569, 2020b. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistaenfermagem/article/view/244569>. Acesso em: 7 nov. 2025.

SOUZA, M. J.; LIMA, P. F. Qualidade do solo e sodificação em áreas de manejo na região de Picos e Itainópolis, Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 37, n. 1, p. 75–82, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902006000100011>. Acesso em: 7 nov. 2025.

STRAND, J. et al. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon forest's ecosystem services. **Nature Sustainability**, [S. l.], v. 1, n. 11, p. 657–664, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41893-018-0171-8>. Acesso em: 8 nov. 2025.

VASCONCELOS, S. S. **Influência das variáveis meteorológicas na ocorrência de incêndios florestais na região Nordeste do Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufcg.edu.br/handle/riufcg/1360>. Acesso em: 8 nov. 2025.