

Análise espaço-temporal da ocorrência de incêndios ao longo da Estrada de Ferro Carajás, Amazônia Oriental (2012–2021)

Spatiotemporal analysis of fire occurrence along the Carajás Railway corridor, Eastern Amazon (2012–2021)

Aécio Marcos Cunha *, Emily Ane Dionízio *, Paulo Rógenes Monteiro Pontes *, Rosane Barbosa Lopes Cavalcante **

* Instituto Tecnológico Vale

** Instituto Tecnológico Vale, rosanecavalcante@gmail.com

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v65i1.101094>

Resumo

O fogo é comumente utilizado na Amazônia para limpeza e manejo da terra, resultando em impactos ambientais e climáticos significativos, incluindo emissões de gases de efeito estufa, perda de biodiversidade e poluição do ar. Compreender a dinâmica espaço-temporal da ocorrência de incêndios é essencial para melhorar as estratégias de prevenção e priorizar áreas para monitoramento e controle. Este estudo tem como objetivo analisar a distribuição espacial e temporal dos focos de calor ao longo da Estrada de Ferro Carajás (EFC), que conecta áreas de mineração no sudeste do Pará ao porto no Maranhão. Foram examinados focos de calor detectados por satélite entre 2012 e 2021 em 28 municípios cortados pela ferrovia. Combinamos análises intra e interanuais com classificações de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomas e aplicamos a Estimativa de Densidade por Kernel para identificar zonas de alto risco ao longo do tempo. Os resultados indicam picos de atividade de fogo em 2015 e 2017, influenciados por eventos de El Niño, com zonas propensas a incêndios se deslocando espacialmente ao longo da estação de queimadas. As pastagens responderam por mais de 98 mil registros de fogo, seguidas por formações florestais com mais de 62 mil, refletindo a vulnerabilidade tanto de paisagens antrópicas quanto nativas. Os achados destacam a importância de integrar previsões de incêndios com o monitoramento climático e do uso da terra para orientar estratégias adaptativas de manejo na Amazônia Oriental.

Palavras-chave:

Incêndios florestais, Uso da terra, Estimativa de densidade por kernel, Corredor ferroviário.

Abstract

Fire is commonly used in the Amazon for land clearing and management, resulting in significant environmental and climatic impacts, including greenhouse gas emissions, biodiversity loss, and air pollution. Understanding the spatiotemporal dynamics of fire occurrences is essential for improving prevention strategies and prioritizing areas for monitoring and control. This study aims to analyze

the spatial and temporal distribution of fire hot spots along the Carajás Railway (CR), which connects mining areas in southeastern Pará to the port in Maranhão. We examined detected satellite-based hot spots from 2012 to 2021 across 28 municipalities intersected by the railway. We combined intra-annual and interannual analyses with land use and land cover classifications from the MapBiomas Project and applied Kernel Density Estimation to identify high-risk zones over time. The results indicate that fire activity peaks occurred in 2015 and 2017, largely influenced by El Niño events, with fire-prone zones shifting spatially throughout the fire season. Pastures accounted for over 98,000 fire records, followed by forest formations with over 62,000, reflecting the vulnerability of both anthropogenic and native landscapes. The findings highlight the importance of integrating fire forecasts with climatic and land-use monitoring to inform adaptive management strategies along key infrastructure corridors in the Eastern Amazon.

Keywords:

Forest fires, Land use, Kernel density estimation, Railway corridor.

I. INTRODUÇÃO

A Amazônia é uma das regiões mais biodiversas do planeta (Jenkins et al., 2013; Raven et al., 2020; IUCN, 2024), desempenhando um papel crítico na regulação do clima global e no ciclo do carbono (Jung et al., 2021). No entanto, continua enfrentando pressões crescentes decorrentes da mudança no uso da terra, especialmente o desmatamento para a expansão da pecuária e de monoculturas (MapBiomas, 2024). Embora a possibilidade de ocorrência natural de incêndios na floresta amazônica seja baixa (Cochrane, 2009), o fogo é amplamente utilizado como ferramenta para limpeza e manutenção de pastagens e áreas agrícolas (Alencar et al., 2020; Miranda et al., 2018; Pinto et al., 2017), podendo sair do controle em algumas situações (Aragão; Shimabukuro, 2010). Incêndios florestais contribuem para a degradação da floresta (Xaud et al., 2013; Lapola et al., 2023), emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Cochrane, 2009; Van der Werf et al., 2010) e poluição do ar (Rocha; Sant'Anna, 2022; Oliveira et al., 2023), com impactos na saúde pública e risco à vida (Human Rights Watch et al., 2020).

Além da relação com a dinâmica de uso da terra, (Martinez et al., 2017), os eventos de fogo na Amazônia também são influenciados pela variabilidade intra-anual do clima, ocorrendo quase todos durante a estação seca, e pela variabilidade climática interanual, a qual oscila entre anos mais secos ou mais úmidos dependendo da influência de fenômenos meteorológicos como por exemplo os episódios do El Niño–Oscilação Sul (ENOS). Na Amazônia, o El Niño aumenta o risco de secas prolongadas e de incêndios descontrolados (Masullo, 2018; Sodré et al., 2018). Em anos mais secos, o fogo pode adentrar áreas de floresta (Latorre et al., 2016), especialmente em áreas previamente degradadas, causando danos a florestas primárias e secundárias (Nepstad et al., 1999; 2004; Aragão et al., 2008; Cochrane; Barber, 2009). O período de ocorrência de incêndios na

Amazônia já está aumentando (Jolly et al., 2015) e, com as mudanças climáticas, é esperado um aumento na frequência de incêndios e na duração da estação de incêndios na região (Sun et al., 2019), com efeito sinérgico e de retroalimentação com o causado pelo uso da terra (Castelanos et al., 2022).

O ano de 2024 registrou a segunda maior área queimada anualmente no Brasil desde 1985 e, pela primeira vez, as formações florestais foram a classe de uso da terra mais afetada pelo fogo na Amazônia, superando as pastagens (MapBiomas Queimadas, 2025). Em 2023, o estado do Pará apresentou as maiores emissões de GEE devido às mudanças no uso da terra e aos incêndios (SEEG, 2024). Uma região de particular preocupação é o entorno da Estrada de Ferro Carajás (EFC), que atravessa 28 municípios nos estados do Pará e do Maranhão. A EFC é um importante corredor logístico para a exportação de minério de ferro, e sua rota intercepta florestas preservadas, áreas de pastagem e zonas de conversão ativa da terra. Esse mosaico de usos do solo, combinado com as condições climáticas sazonais, torna a região suscetível a recorrentes focos de incêndio trazendo riscos às áreas de cobertura natural, mas também às populações que vivem no entorno da malha ferroviária.

O monitoramento das ocorrências de fogo por meio de imagens de satélite tem sido fundamental para rastrear padrões espaço-temporais, mudanças nos regimes de fogo e para subsidiar políticas públicas voltadas à conservação ambiental e ao manejo do fogo (Anderson et al., 2017; Fragal; Gasparetto, 2017). Para capturar dados sobre a ocorrência de incêndios, os satélites utilizam sensores térmicos que permitem detectar picos de calor na superfície terrestre, geralmente relacionados a queimadas. Essa ferramenta é eficaz na identificação de zonas suscetíveis ao fogo e pode apoiar estratégias de prevenção, especialmente em áreas sob crescente pressão antrópica como na Amazônia oriental.

Neste contexto, o estudo tem como objetivo analisar os padrões espaciais e temporais das ocorrências de fogo ao longo do corredor da EFC entre 2012 e 2021, utilizando dados de detecção de focos de calor por satélite e informações sobre uso da terra para identificar áreas de risco e apoiar práticas aprimoradas de manejo do fogo na Amazônia Oriental. A ocorrência de incêndios nas proximidades da EFC pode causar a paralisação da mesma, com grandes consequências ao transporte de cargas e de passageiros, além dos impactos às comunidades e ao ecossistema. A expansão para os limites municipais foi feita devido ao efeito de fatores políticos na ocorrência de incêndios, como pode ser o caso de ações ou legislações municipais relacionadas ao tema. Essa análise permite compreender a espacialidade do fogo na região não apenas em decorrência de variações naturais, como o clima, mas como processo socialmente produzido que se reflete no uso da terra e nas práticas de manejo locais, que moldam territórios de risco ambiental.

Diversos estudos analisaram a ocorrência de focos de calor na Amazônia, mas usualmente se concentram em um único município ou unidade de conservação (ex.: Pereira et al., 2018; Gama et al., 2019; Santos et al., 2021). Ao avaliar uma região mais ampla e de grande importância econômica, este estudo permite a identificação de áreas com maior ocorrência que ultrapassam limites municipais, otimização do manejo do fogo, sem perder o nível de detalhe necessário para definir ações em escala municipal e regional, subsidiando iniciativas público-privadas de gestão de riscos.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo concentra-se nos municípios cruzados pela Estrada de Ferro Carajás (EFC), um corredor de 892 quilômetros que se estende desde o município de Canaã dos Carajás, no sudeste do Pará, até o Porto de Ponta da Madeira, em São Luís, Maranhão (Figura 1). A EFC percorre uma região de significativa importância ecológica e econômica, caracterizada por um mosaico diverso de tipos de uso da terra, incluindo florestas preservadas, vegetação secundária, pastagens, áreas urbanas e zonas de extração mineral. A ferrovia atravessa 27 municípios (sendo 5 municípios localizados no estado do Pará e 22 no Maranhão), que juntos abrangem uma área de aproximadamente 176.000 km².

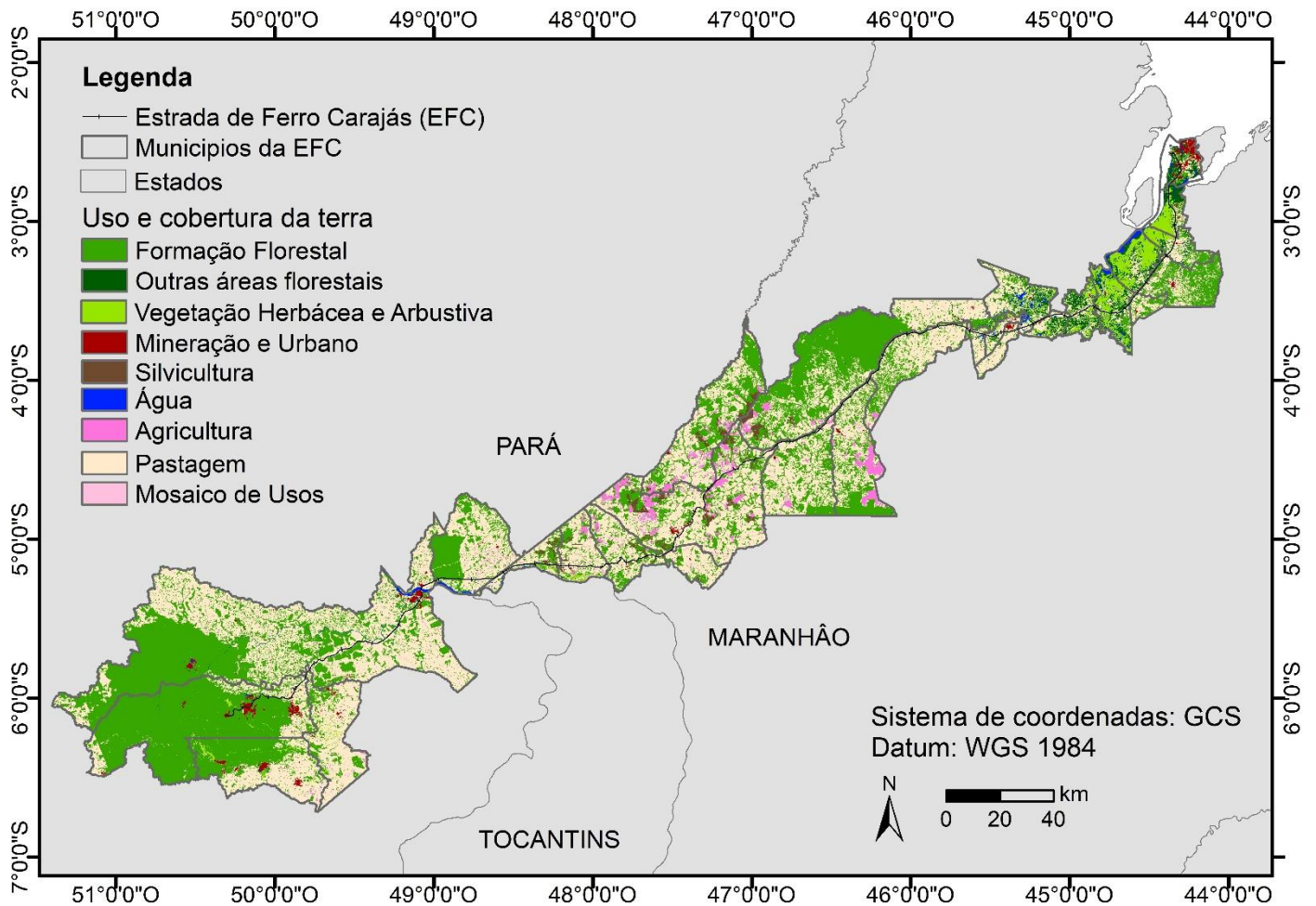


Figura 1 – Uso e cobertura da terra nos municípios da Estrada de Ferro Carajás em 2021 (Fonte: Projeto MapBiomias).

A área está inserida no bioma Amazônia, sendo que as florestas e as pastagens atualmente predominam no uso e cobertura da terra nos municípios analisados (Figura 1). A vegetação original era predominantemente composta por florestas ombrófilas densas, além de florestas ombrófilas abertas e refúgios de vegetação montana no Pará, que nos municípios ao sul da EFC (Parauapebas e Canaã dos Carajás) correspondem aos campos rupestres ferruginosos; e por florestas ombrófilas densas de terras baixas, florestas sazonais semidecíduas aluviais e formações pioneiras fluviais e lacustres com influência fluviométrica no Maranhão (IBGE, 2022).

O clima predominante, segundo a classificação de Köppen (1948), é do tipo Aw (tropical com estação chuvosa no verão), com inverno seco, estação de chuvas entre novembro e abril, e estação seca bem definida

entre maio e outubro (sendo julho o mês mais seco). A temperatura média anual é de 27,4 °C e a precipitação anual alcança cerca de 1.900 mm.

Dados de focos de calor

Os dados de ocorrência de fogo foram obtidos a partir do Banco de Dados de Áreas Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esse banco fornece detecções diárias de focos de calor ativos via satélite, com base em anomalias térmicas captadas por diversos sensores. Utilizou-se o sensor Visible Infrared Imaging spectroRadiometer Suite (VIIRS) a bordo do satélite orbital polar Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP-Suomi) como referência. Este sensor possui uma resolução espacial de 375 metros e revisita diária (NASA, 2020). A área mínimo teórica de incêndio noturno detectável é de apenas 5 m² e incêndios cuja temperatura atinjam 1000 K, com um erro de comissão médio de apenas 1.2% (Schroeder et al., 2014). O produto fornece o centroide de todos os pixels com detecção de focos. O uso de um único satélite de referência permite a comparação espacial e temporal dos dados sem a interferência do número de satélites e passagens orbitais, além de viabilizar a composição de séries temporais ao longo dos anos e a análise de tendências no número de focos para as mesmas regiões ou entre diferentes regiões em períodos de interesse.

O satélite NPP-Suomi foi lançado em 2011 e os dados são coletados pelo sensor VIIRS com resolução espacial de 375 metros. Para este estudo, os dados de focos de calor foram extraídos para o período de janeiro de 2012 a dezembro de 2021. Cada foco de calor inclui informações sobre a data de detecção, localização (latitude e longitude) e horário da aquisição. Foram realizadas agregações mensais e anuais por município para análises inter e intraanuais.

Estimativa de densidade de kernel

Para caracterizar a distribuição espacial da atividade de fogo durante a estação seca, aplicou-se a técnica de Estimativa de Densidade por Kernel (EDK) (Bailey; Gratell, 1995). A EDK é um método de análise espacial não paramétrico que calcula a densidade de eventos (neste caso, focos de calor) sobre uma superfície contínua, permitindo identificar aglomerados e áreas de alto risco.

As saídas da EDK foram geradas utilizando o software ArcMap com um raio de busca (largura de banda) padrão, calculado com base na configuração espacial e no número de pontos de entrada, a fim de corrigir a influência de outliers espaciais. A função um Kernel Quártico (Silverman, 1986), calculando a densidade pela equação abaixo, onde: $i = 1, \dots, n$ são os pontos de focos de calor dentro da distância do raio de busca; pop_i é o

valor do campo de população do ponto i , que é um parâmetro opcional e $dist_i$ é a distância entre o ponto i e o local (x,y) .

$$Densidade = \frac{1}{raio^2} \sum_{i=1}^n \left[\cdot pop_i \left(1 - \left(\frac{dist_i}{raio} \right)^2 \right)^2 \right] \quad (\text{Equação 1})$$

O resultado foi categorizado em cinco níveis de risco com base na ocorrência de focos de calor por ano:

- Muito baixo (0–1.000),
- Baixo (1.001–2.000),
- Médio (2.001–6.500),
- Alto (6.501–10.000),
- Muito alto (10.001–100.000).

Para a análise de dados mensais, esses mesmos limites foram divididos por 12.

Também foram examinados os agrupamentos temporais das ocorrências de fogo, com o objetivo de identificar padrões sazonais e variações interanuais. O deslocamento espacial das áreas com maior densidade de fogo ao longo do ano foi visualizado por meio da geração de mapas EDK para diferentes meses.

Classificação de uso e cobertura da terra

Os dados de uso e cobertura da terra de 2012 a 2021 foram obtidos do Projeto MapBiomas – Coleção 7 (MapBiomas, 2021). O MapBiomas fornece classificações anuais de uso e cobertura da terra para o Brasil, com resolução espacial de 30 metros, utilizando imagens Landsat e algoritmos automatizados de classificação.

Cada foco de calor foi sobreposto espacialmente ao respectivo mapa do Mapbiomas do ano de ocorrência, com o objetivo de quantificar o número e a densidade de eventos de fogo por tipo de uso. Essa abordagem possibilitou identificar os tipos de uso da terra mais afetados pelos incêndios e apoiou a interpretação dos padrões espaciais de fogo em relação a paisagens antrópicas ou naturais.

Análises estatísticas

Para avaliar se a ocorrência de incêndios em áreas de pastagem apresenta um padrão espacial não aleatório, utilizamos o índice de Moran aplicado aos dados de densidade de focos de calor para todos os anos. Esse índice mede a autocorrelação espacial, ou seja, o grau em que valores semelhantes (altos ou baixos) estão agrupados geograficamente. Quanto maior o valor de Moran's I, maior a evidência de agrupamento espacial. O teste também fornece um p-valor, que indica a probabilidade de o padrão observado ter ocorrido por acaso.

Valores de $p < 0,05$ indicam que o agrupamento é estatisticamente significativo. Essa análise foi realizada no software Arcgis Pro.

Para avaliar a distribuição e diferenças na densidade de focos de calor entre classes de uso da terra foi inicialmente realizada uma verificação da normalidade dos dados por grupo utilizando o teste de Shapiro-Wilk, com amostragem aleatória em casos com mais de 5000 observações. Visto que os dados não são normalmente distribuídos, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis com comparações pareadas de Wilcoxon para comparar as médias de densidade de focos entre os usos da terra (floresta, pastagem e outros) para cada ano.

III. RESULTADOS

Detecção de focos de calor

Entre 2012 e 2021, foi registrado um total de 194.490 focos de calor nos 27 municípios ao longo da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Os valores anuais atingiram picos em 2015 (especialmente, mas não exclusivamente nos municípios do Pará) e em 2017 (nos municípios do Maranhão) (Figura 2A). O primeiro pico esteve associado a episódios intensos de El Niño, que agravaram as condições de seca na Amazônia.

Entre os municípios, Marabá (Pará) apresentou o maior número de focos no período analisado, com mais de 38.000 registros ao longo dos 10 anos (Figura 2A). Considerando a área do município (15.128 km²), isso equivale a uma média de 0,25 focos/ano/km². No entanto, se removermos todas as áreas de proteção ambiental, encontraremos o município de Parauapebas - PA liderando números de focos com 0,58 focos/ano/km² em áreas municipais não protegidas. No Maranhão, foram observadas densidades ainda maiores, especialmente no município de Buriticupu, com uma média de 0,69 focos/ano/km² (Figura 2B).

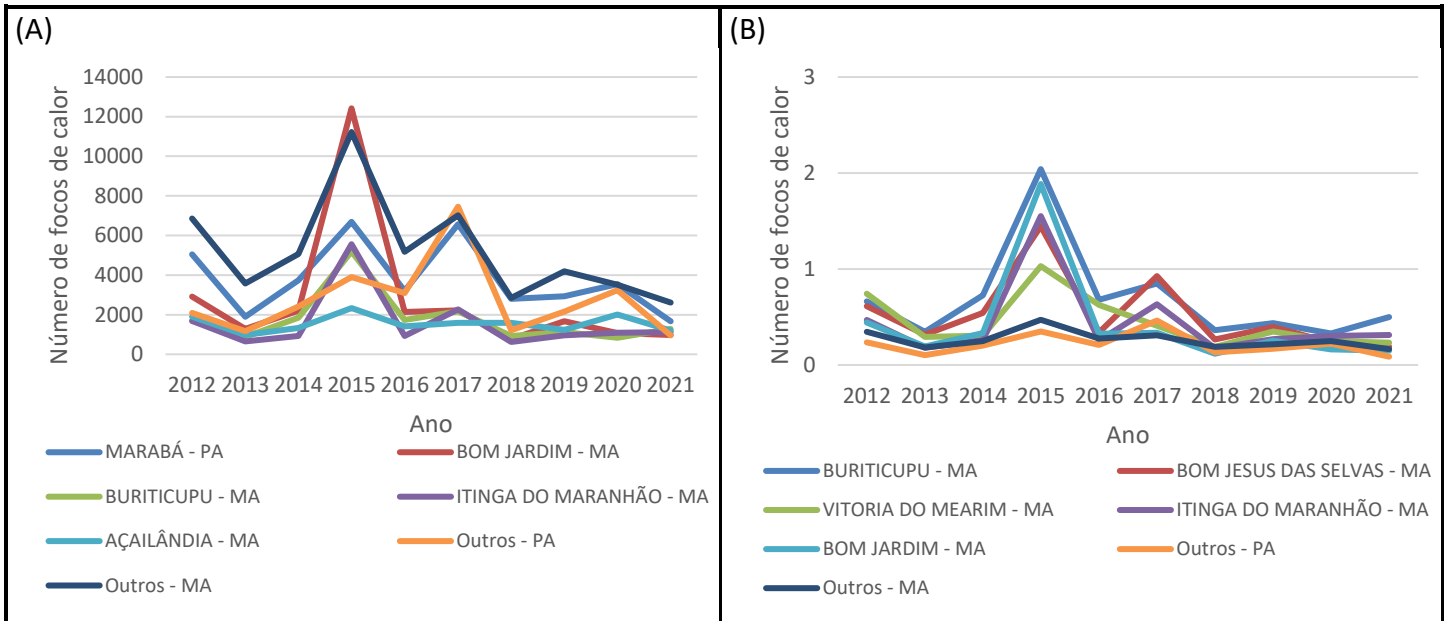


Figura 2 – (A) Número total e (B) densidade de focos de calor nos municípios ao longo da Estrada de Ferro Carajás de 2012 a 2021. Os 5 municípios com os maiores valores médios são apresentados e os demais são agregados por estado: Pará (PA) e Maranhão (MA).

Do ponto de vista sazonal, as ocorrências de fogo estiveram altamente concentradas entre agosto e dezembro, correspondendo a aproximadamente 92% de todas as detecções. O trimestre crítico nos municípios do Pará foi de outubro a dezembro, enquanto nos municípios do Maranhão foi de agosto a outubro (Figura 3). Como resultado, o mês de outubro respondeu por 26% da atividade anual de fogo. Apesar das flutuações interanuais, o padrão da estação seca manteve-se consistente ao longo da década.

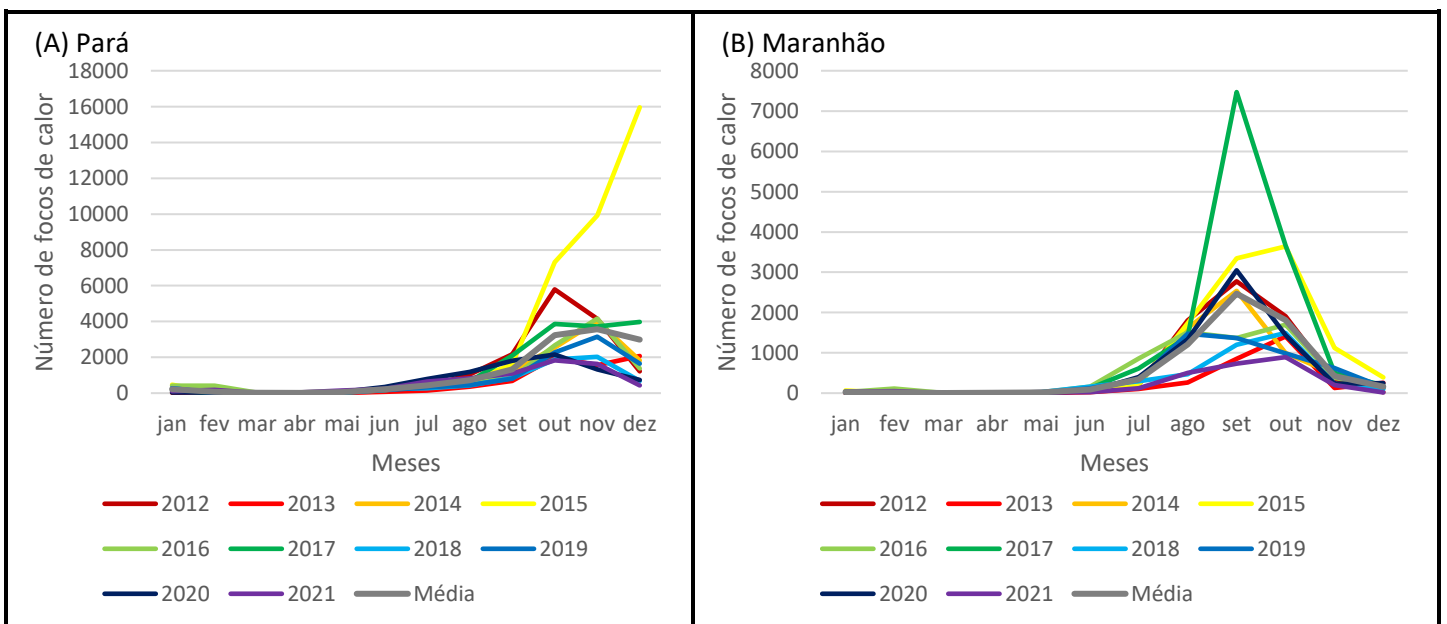
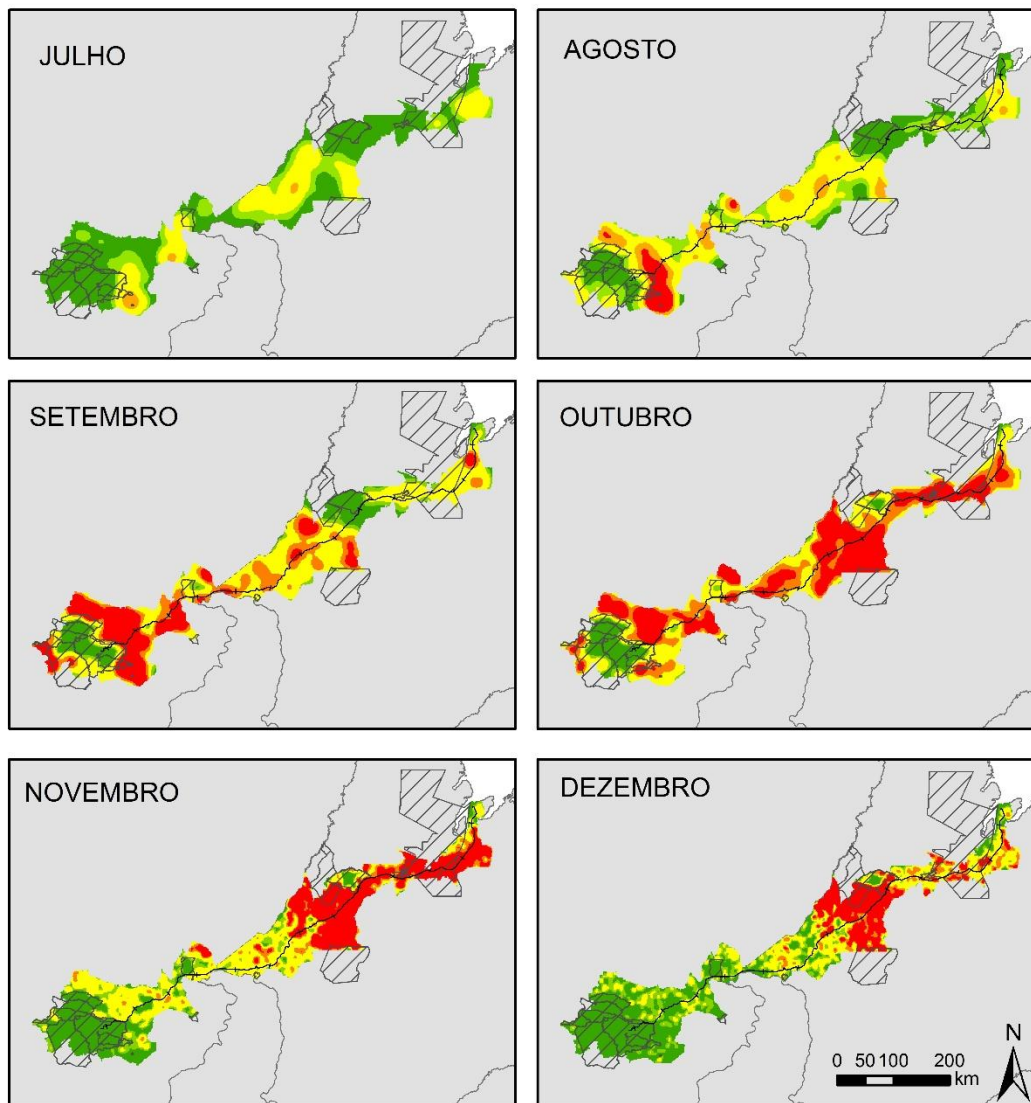


Figura 3 – Número de focos de calor por mês nos municípios ao longo da Estrada de Ferro Carajás no Pará (A) e no Maranhão (B). Os valores médios mensais (preto) e os valores do ano com o maior número de focos de calor (cinza-escuro) estão destacados.

Mapas de Densidade de Focos de Calor

Considerando o primeiro semestre do ano, período com baixa ocorrência de incêndios na região de estudo, praticamente toda a área foi classificada como de risco muito baixo para ocorrência de fogo. Apenas pequenas regiões foram classificadas com risco moderado em janeiro, maio e junho.

Durante o segundo semestre, a Estimativa de Densidade por Kernel (EDK) revelou padrões espaciais distintos na ocorrência de incêndios, com zonas de alta densidade se deslocando ao longo do corredor ferroviário durante a estação seca. De julho a setembro, as áreas de risco alto e muito alto concentraram-se predominantemente no segmento sudoeste da ferrovia, predominantemente no estado do Pará. Em outubro, quase toda a região esteve sob risco elevado, exceto pelos agrupamentos de áreas protegidas (Figura 4). De novembro a dezembro, a concentração espacial do risco de incêndio se deslocou para a porção nordeste do corredor, no Maranhão.



Sistema de coordenadas: GCS

Datum: WGS 1984

Legenda

— Estrada de Ferro Carajás

▨ Área Protegida

▭ Estados

Densidade de Kernel

■ Muito baixo

■ Baixo

■ Médio

■ Alto

■ Muito alto

Figura 4 – Risco de incêndios (classificado com base na densidade histórica de ocorrência de focos de calor) de julho a dezembro nos municípios do Corredor da Estrada de Ferro Carajás.

Os resultados das análises anuais de densidade por kernel mostram que, nos anos com maior ocorrência de focos (2015 e 2017), os mesmos se concentraram na região central da EFC, nos municípios de Itinga do Maranhão, Bom Jardim e Buriticupu, e na porção sul da área de estudo, nos municípios de Marabá e Curionópolis. Em 2013 e 2021 (Figuras 5C e 5D), que registraram os menores totais de focos, observam-se apenas pequenas áreas com classificação de ocorrência alta a muito alta na região central.

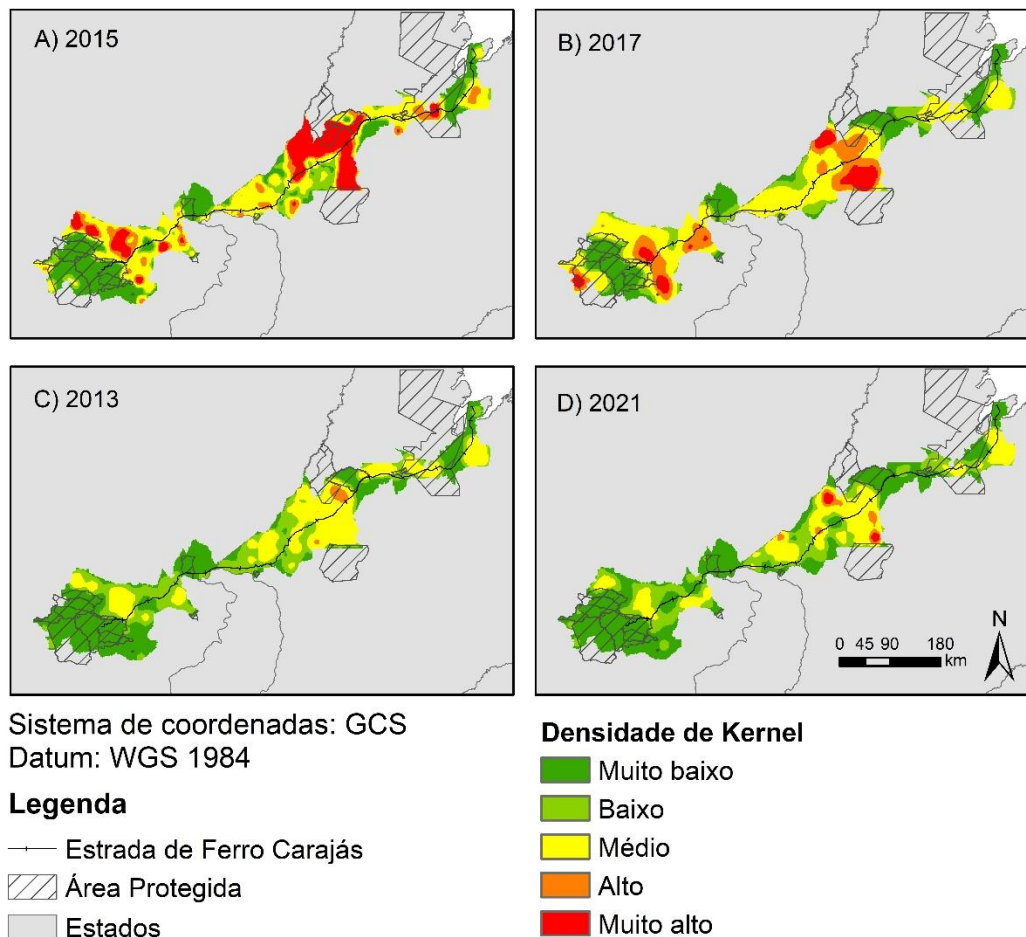


Figura 5 – Mapas de densidade por kernel para os anos com maior ocorrência de focos: A) 2015 e B) 2017; e para os anos com menor ocorrência: C) 2013 e D) 2021.

Além disso, o índice de Moran aplicado ao mapa EDK para todos os anos analisados foi de aproximadamente 0,99, indicando um forte padrão de autocorrelação espacial positiva. Esse resultado demonstra que os focos de incêndio estão altamente agrupados no espaço, e que há menos de 1% de probabilidade desse padrão ser fruto do acaso ($p < 0,01$).

Incidência de Fogo por Uso e Cobertura da Terra

Entre 2012 e 2021, as formações florestais ocuparam cerca de 31.800 km² da bacia analisada, enquanto as pastagens cobriram cerca de 29.300 km² (Figura 6A). A análise dos focos de calor por uso e cobertura da terra indicou que as pastagens concentraram a maior parte das detecções, com 98.185 focos de calor registrados no período, uma média de 0,32 focos/km²/ano. Já as formações florestais responderam por 62.079 focos, com uma densidade média de 0,20 focos/km²/ano, evidenciando a vulnerabilidade tanto de paisagens antrópicas quanto nativas. Para ambas as principais categorias de uso da terra, os picos de ocorrência de focos foram observados nos mesmos anos: 2015, 2017 e 2012. As outras classes de usos da terra possuem uma ocorrência muito menor e grande variação de classes com maiores erros de detecção, por isso não são apresentadas.

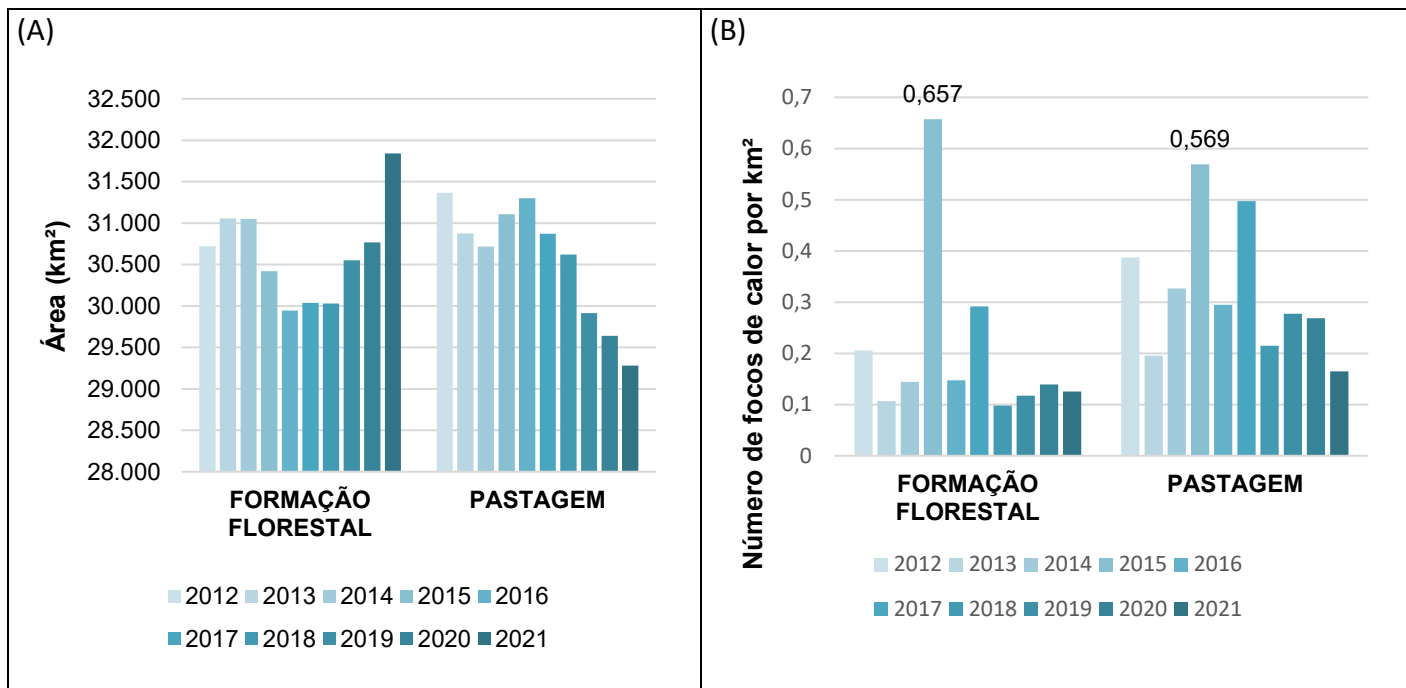


Figura 6 – (A) Área de pastagem e floresta e (B) densidade de focos de calor nessas classes de uso da terra nos municípios da EFC entre os anos de 2012 e 2021.

As áreas de pastagem apresentaram uma maior densidade de focos de calor do que as áreas de floresta para todos os anos analisados, exceto por 2015. As áreas com outras classes de uso da terra apresentaram, em geral, uma densidade de foco intermediária entre estes dois extremos. As diferenças entre estas classes foram estatisticamente significativas (p-value < 0,05) para todos os anos.

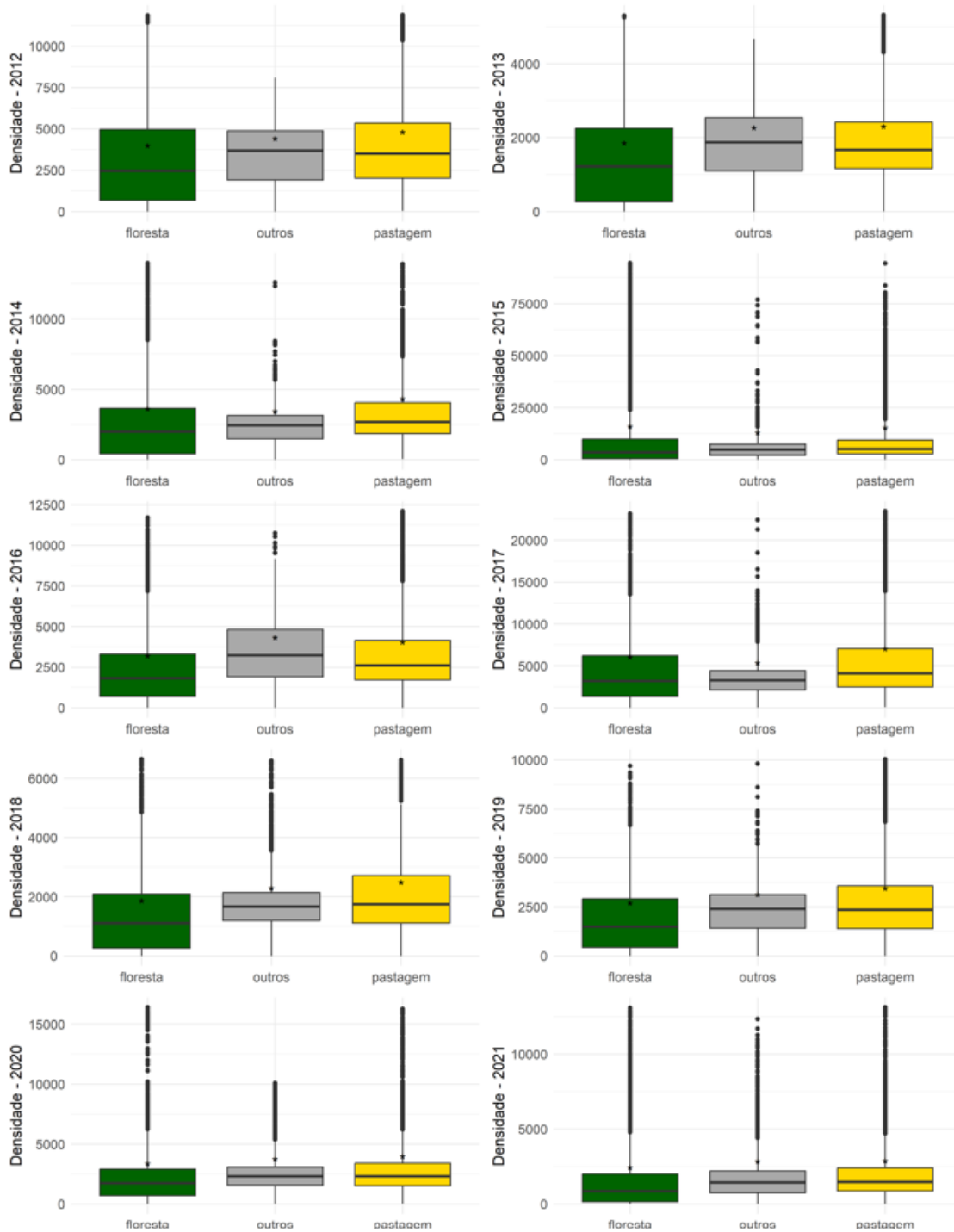


Figura 7 – Box-plot anual da densidade de focos de calor por classes de uso da terra nos municípios da EFC entre os anos de 2012 e 2021. A densidade média está indicada por asterisco.

IV. DISCUSSÕES

Um padrão de sazonalidade dos incêndios é evidenciado ao longo da Estrada de Ferro Carajás, com a maior parte das ocorrências concentradas entre agosto e outubro — comportamento consistente com o

observado em estudos anteriores sobre o regime de fogo na Amazônia Oriental (Aragão et al., 2018) e em todo o território nacional (MapBiomas Fogo, 2025).

Os picos de atividade de fogo em 2015 e 2017 coincidem com eventos conhecidos de El Niño, os quais são associados ao aumento da intensidade da seca e ao maior risco de incêndios em toda a Bacia Amazônica (Chen et al., 2011; Alencar et al., 2015). Os anos de 2015 a 2017 apresentaram as maiores áreas queimadas na Amazônia durante o período analisado (MapBiomas Fogo, 2025), reforçando a sensibilidade climática da dinâmica do fogo.

A análise por classe de uso da terra confirma que a maioria dos incêndios ocorreu em pastagens, não apenas devido à sua natureza extensiva, mas também devido à prática comum de uso do fogo para limpeza de áreas (Moura et al., 2020). No entanto, o elevado número de focos de incêndio em áreas florestais durante os anos de seca revela ameaças contínuas à vegetação nativa. Especificamente na região sul do Pará, espera-se um aumento na duração e na intensidade do período de seca devido às mudanças climáticas (Pontes et al., 2022), o que pode causar um aumento na ocorrência de incêndios em áreas de floresta.

A densidade média anual de focos observada para áreas florestadas foi de aproximadamente 0,2 focos/km²/ano (Figura 9), considerada alta para áreas de floresta amazônica (por exemplo, em comparação com Rosan et al. (2017)). Esse valor é influenciado pelo aumento acentuado dos focos em áreas florestais observado durante a seca severa de 2015, mas também pode refletir a degradação e fragmentação da paisagem, a derrubada de florestas secundárias e a propagação do fogo ao longo das bordas florestais. Neste ano, a densidade de focos em áreas de florestas chegou a ser superior ao observado nas áreas de pastagem. Um padrão semelhante foi observado no município de São Félix do Xingu (PA) após a seca de 2010 (Rosan et al., 2017). A intensificação das queimadas em anos de El Niño contribui significativamente para o aumento das emissões de carbono e para a degradação florestal a longo prazo (Aragão et al., 2018), tornando-se um problema crônico no combate às mudanças do clima e redução das emissões pelo setor de uso da terra. Florestas tropicais intactas são menos propensas ao fogo, mas florestas secundárias (Adorno et al., 2025) ou florestas com algum tipo de degradação, que predominam em ambientes altamente fragmentados, são mais vulneráveis a incêndios (Guedes et al., 2020). A degradação de florestas pelo fogo causa ainda impactos à biodiversidade, especialmente no caso de queimadas recorrentes (Xaud et al., 2013).

A progressão dos focos de calor do sudoeste para o nordeste durante a estação seca reflete a variabilidade espacial nos padrões de chuva, nos tipos de vegetação e nas próprias fontes de ignição. Fonseca et al. (2021) observaram esse mesmo padrão de distribuição do fogo nos estados Maranhão e Tocantins, e

Pereira et al. (2014) no Pará. Os aglomerados de alta densidade de focos de calor identificados em municípios como Buriticupu e Marabá são consistentes com seu histórico de pressão sobre o uso da terra, incluindo expansão de pastagens e frentes de desmatamento associadas à expansão das rodovias.

A recorrência dos incêndios nestas regiões ressalta a necessidade de programas de educação ambiental que promovam alternativas ao uso do fogo no manejo da terra, bem como investimento em capacitação das comunidades para controle e combate a incêndios para evitar o espalhamento desordenado do fogo. Sistemas e plataformas de monitoramento que utilizem dados geoespaciais capazes de capturar essa concentração sazonal e espacial dos focos podem ser alternativas eficientes para direcionamento dos esforços de prevenção, especialmente em zonas dominadas por pastagens nos meses que antecedem o mês de agosto, para evitar a escalada dos incêndios durante o pico da estação seca, sobretudo em anos com El Niño. Esse ponto é especialmente relevante para áreas como o município de Buriticupu, que apresentou as maiores médias de densidade de fogo ao longo da década. As análises espaciais da EDK mensais também podem ser uma ferramenta estratégica para identificar regiões que merecem maior alocação de recursos para vigilância, combate e fiscalização ambiental, especialmente aquelas próximas de unidades de conservação, terras indígenas e comunidades tradicionais que podem ser mais suscetíveis aos efeitos deletérios do fogo. No contexto da área de estudo, merecem atenção especial a Reserva Biológica Gurupi e a Terra Indígena Caru, ambas no estado do Maranhão.

Com base na análise da dinâmica espacial de uso da terra e da ocorrência do fogo, observa-se uma grande oportunidade de otimizar as ações de mitigação da ocorrência de fogo entre municípios e até entre estados na Amazônia oriental. Por exemplo, ativos utilizados para as atividades de prevenção e de combate podem ser disponibilizados para os municípios mais ao sul da região de estudo no início do período seco e depois serem repassados aos municípios mais ao norte no final. A Lei Federal 14.944 de 2024, que instituiu a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo, tem entre suas diretrizes a gestão participativa e compartilhada entre os entes federativos, a sociedade civil organizada, os povos indígenas, as comunidades quilombolas, outras comunidades tradicionais e a iniciativa privada. Esta responsabilidade compartilhada e necessidade de articulação para criação de programas e planos que promovam o manejo integrado do fogo também são ressaltadas no Programa Estadual de Prevenção e Combate às Queimadas e Incêndios Florestais do estado do Pará (Decreto 4.739 de 2025). Ambos os modelos de planejamento e gestão associam aspectos ecológicos, culturais, socioeconômicos e técnicos na prevenção e no combate aos incêndios florestais, respeitado o uso tradicional e adaptativo do fogo. Durante o período de maior ocorrência de incêndio, a ocorrência de fogo em

agrupamentos mostra que ações de prevenção e fiscalização devem ser desenvolvidas no entorno dos locais onde ocorrem as primeiras detecções de incêndio. Além disso, a integração de previsões climáticas sazonais no planejamento territorial destes municípios e na gestão de risco de fogo pode melhorar a preparação dos órgãos governamentais e do setor privado e reduzir impactos causados pelas queimadas.

A coordenação com empresas que operam ao longo da ferrovia também é essencial, uma vez que suas atividades interceptam áreas de alto risco de ocorrência de fogo. Uma colaboração público-privada também pode ser chave para fortalecer os sistemas de detecção, monitoramento e combate aos incêndios em todo o corredor ferroviário.

V. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram como os incêndios ao longo da Estrada de Ferro Carajás seguem padrões sazonais bem definidos, com forte influência de eventos climáticos e do uso da terra. Os picos de detecção de focos ocorrem de agosto a outubro nos municípios a sudoeste (PA) e de outubro a dezembro no nordeste (MA). Este trabalho mostra o agrupamento das ocorrências de incêndios, com áreas recorrentemente com altas ocorrências, e uma maior densidade de focos em áreas de pastagem. Porém, no ano mais seco da série histórica analisada a densidade de focos em áreas de floresta chegou a superar a de pastagens, evidenciando uma perda de resiliência e alteração de padrões. Deste modo, as análises de densidade de focos e a relação com o uso da terra permitem identificar áreas críticas com antecedência, otimizar o uso de recursos e orientar ações focadas — tanto em escala municipal quanto intermunicipal.

Essas informações devem ser incorporadas de forma sistemática em planos de prevenção, fiscalização e combate aos incêndios, considerando a sazonalidade, os gatilhos climáticos (como o El Niño) e as pressões locais sobre a terra. A atuação conjunta entre governos, setor privado e sociedade civil, baseada em inteligência espacial, é fundamental para reduzir os impactos ambientais e sociais do fogo na Amazônia Oriental.

Investir na integração de sistemas de monitoramento com políticas públicas e ações locais não é apenas uma recomendação técnica, é um imperativo estratégico para a sustentabilidade da região.

VI. REFERÊNCIAS

- ADORNO, B. F. C. B.; PIRATELLI, A. J.; HASUI, E.; RIBEIRO, M. C.; VAZ, P. G. Relative fire-proneness of land cover types in the Brazilian Atlantic forest. *Journal of Environmental Management*, v. 374, p. 124066, 2025.
- ALENCAR, A.; GREGORY P. A.; DAVID KNAPP, D. Z. "Temporal Variability of Forest Fires in Eastern Amazonia." *Ecological Applications*, v. 21, n. 7, p. 2397–2412, 2011.

- ALENCAR, A.; RODRIGUES, L.; CASTRO, T. Amazônia em chamas: O que queima – e onde. Nota Técnica, IPAM Amazônia. <https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2020/08/NT5-pt-final.pdf>. Agosto, 2020.
- ANDERSON, L. O.; CHEEK, D.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERE, L.; DUARTE, B.; SALAZAR, N.; LIMA, A.; DUARTE, V.; ARAI, E. Development of a Point-based Method for Map Validation and Confidence Interval Estimation: A Case Study of Burned Areas in Amazonia. *Journal of Remote Sensing & GIS*, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2017.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2018.
- ARAGÃO, L. E. O.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; et al. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1498, p. 1779-1785, 2008.
- ARAGÃO, L. E. O.; SHIMABUKURO, Y. E. The Incidence of Fire in Amazonian Forests with Implications for REDD. *Science*, v. 328, p. 1275-1278, 2010.
- BAILEY, A. C.; GATRELL, T. C. *Interactive Spatial Data Analysis*, Cap. 1, Longman, London, 1995. Disponível em: <http://www.personal.psu.edu/faculty/f/k/fkw/rsoc597/Introduction.pdf>. Acesso em: 18/03/2019.
- CASTELLANOS, E.; LEMOS, M. F.; ASTIGARRAGA, L.; et al. Central and South America. In: PORTNER, H. O.; ROBERTS, D. C.; TIGNOR, M.; et al. (eds) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1689-1816. 2022.
- COCHRANE, M. *Tropical fire ecology: climate change, land use and ecosystem dynamics*. Springer, New York, NY. 2009.
- COCHRANE, M. A.; BARBER, C. P. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. *Global Change Biology*, v. 15, n. 3, p. 601-612, 2009.
- FONSECA, A.; JUSTINO, M.; CARDOSO, D.; RIBEIRO, J.; SALOMÃO, R. Boletim do desmatamento da Amazônia Legal (fevereiro de 2019). Belém-PA: IMAZON, 1p. 2019.
- FRAGAL, E. H.; GASPARETTO, N. V. L. Análise comparativa de dados e produtos de Sensoriamento remoto com resolução espacial moderada para detecção de áreas queimadas no Parque Nacional de Ilha Grande entre 2007 e 2009. *Bol. Goia. Geogr. (Online)*, v. 37, n. 2, p. 283-301, 2017.
- GAMA, L. H. O. M.; OLIVEIRA, M. J. T.; SILVA, T. C. C.; NEVES, S. A. O.; DIAS, G. F. M. Dinâmica de uso do solo e sua relação com os focos de calor na área de preservação ambiental triunfo do Xingu-PA. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.16, n.29, p. 688-701, 2019.
- GUEDES, B. J.; MASSI, K. G.; EVERS, C.; NIELSEN-PINCUS, M. Vulnerability of small forest patches to fire in the Paraíba do Sul River Valley, southeast Brazil: Implications for restoration of the Atlantic Forest biome. *Forest Ecology and Management*, v. 465, p. 118095, 2020.
- HUMAN RIGHTS WATCH; IPAM AMAZÔNIA; IEPS. “The Air is Unbearable” Health Impacts of Deforestation-Related Fires in the Brazilian Amazon. United States of America, 50 O. ISBN: 978-1-62313-8448, 2020. Disponível em: < https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2020/08/brazil0820_web.pdf >. Acesso em: 03/10/2025.
- IUCN. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2024-1. Disponível em: <<https://www.iucnredlist.org/en>>. Acesso em: 26/8/2024.

JENKINS, C. N.; PIMM, S. L.; JOPPA, L. N. Global patterns of terrestrial vertebrate diversity and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 110, n. 28, p. E2602–10, 2013.

JOLLY, W. M.; COCHRANE, M. A.; FREEBORN, P. H.; et al. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, v. 6, n. 7537, 2015.

JUNG, M.; ARNELL, A.; DE LAMO, X.; et al. Areas of global importance for conserving terrestrial biodiversity, carbon and water. *Nature Ecology & Evolution*, v. 5, n. 11, p. 1499–1509, 2021.

KÖPPEN, W. *Climatologia*. Fundo de Cultura Económica. México, 1948.

LAPOLA, D. M.; PINHO, P.; BARLOW, J.; et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science (New York, N.Y.)*, v. 379, n. 6630, p. eabp8622, 2023.

LATORRE, N. S.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; ANDERE, L.; DUARTE, V.; ARAI, E.; LIMA, A. Impactos de queimadas sobre diferentes tipos de cobertura da terra no leste da Amazônia Legal Brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia* (2017), n. 69/1, Edição Especial Geotecnologias e Desastres Naturais, p. 179-192, 2016.

MapBiomias. FactSheet Fogo. 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2025/06/Fact_Fogo_colecao4.pdf>. Acesso em: 26/11/2025.

MAPBIOMAS. Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2024. Disponível em:<<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>>. Acesso em: <24/11/2024>

MARTINEZ, L. L.; FIEDLER, N. C.; LUCATELI, G. J. Análise das relações entre desflorestamentos e focos de calor. Estudo de caso nos municípios de Altamira e São Félix do Xingu, no Estado do Pará. *R. Árvore, Viçosa-MG*, v.31, n.4, p.695-702, 2007.

MASULLO, Y. A. G. Análise preditiva de ocorrências de incêndios no bioma Amazônico do Maranhão. *GeoTextos*, v. 14, n. 2, p. 185-211, 2018.

MIRANDA, M. R. S.; NEVES, L. F. S.; KREILTLOW, J. P.; NEVES, S. M. A. S. Distribuição de queimadas e mudanças na cobertura vegetal e uso da terra no bioma pantanal, Cáceres-Brasil. *Caminhos de Geografia*, v. 19, n. 65, p. 91–108, 2018.

NASA VIIRS Land Science Team. VIIRS (S-NPP) I Band 375 m Active Fire Product NRT (Vector data)</i> [Data set]. NASA LANCE MODIS at the MODAPS. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.5067/FIRMS/VIIRS/VNP14IMGT_NRT.002 Acesso em: 13/10/2025.

NEPSTAD, D. C.; VERSSIMO, A.; ALENCAR, A.; et al. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, v. 398, n. 6727, p. 505–508, 1999.

NEPSTAD, D.; LEFEBVRE, P.; LOPES DA SILVA, U.; et al. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. *Global change biology*, v. 10, n. 5, p. 704–717, 2004. Wiley.

OLIVEIRA, I. N.; OLIVEIRA, B. F. A.; SILVEIRA, I. H.; et al. Air pollution from forest burning as environmental risk for millions of inhabitants of the Brazilian Amazon: an exposure indicator for human health. *Cadernos de saude publica*, v. 39, n. 6, p. e00131422, 2023.

OLIVEIRA, I. N.; OLIVEIRA, B. F. A.; SILVEIRA, I. H.; MACHADO, L. M. G.; VILLARDI, J. W. R.; IGNOTTI, E. Air pollution from forest burning as environmental risk for millions of inhabitants of the Brazilian Amazon: an exposure indicator for human health. *Caderno de Saúde Pública*, v. 39, n. 6, p. 20232023, 2023.

- PEREIRA, J. A. V.; SILVA, J. B. Detecção de focos de calor no estado da Paraíba: um estudo sobre as queimadas. *Revista Geografia Acadêmica*. v.10, n.1, 2016.
- PEREIRA, L. C.; DA CONCEIÇÃO, M. M. M.; DE SÁ, R. J. S.; ASSUNÇÃO, S. P.; JÚNIOR, A. P. Análise multitemporal de focos de queimada por classe de uso do solo, Paragominas-PA. VII Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia. Belém (PA). 2018.
- PINTO, J. F. S. K. C.; SETZER, A.; MORELLI, F.; GOMES, A. R.; ADAMI, M.; VENTURIERI, A.; GUIMARÃES, T. F. P. L. Dinâmica do uso e cobertura do solo em áreas queimadas de municípios na Amazônia Brasileira. In: ANAIS do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Santos – SP. 2017.
- PONTES, P. R. M.; CAVALCANTE, R. B. L.; GIANNINI, T. C.; COSTA, C. P. W.; TEDESCHI, R. G.; MELO, A. M. Q.; XAVIER, A. C. F. Effects of Climate Change on Hydrology in the Most Relevant Mining Basin in the Eastern Legal Amazon. *Water*, v. 14, 1416, 2022.
- RAVEN, P. H.; GEREAU, R. E.; PHILLIPSON, P. B.; et al. The distribution of biodiversity richness in the tropics. *Science advances*, v. 6, n. 37, p. eabc6228, 2020.
- ROCHA R.; SANT'ANNA, A. A. Winds of fire and smoke: Air pollution and health in the Brazilian Amazon. *World Development*, v. 151, p. 105722, 2022.
- ROSAN, T. M.; ANDERSON, L.; VEDOVATO, L. Assessing the origin of hot pixels in extreme climate years in the Brazilian Amazon. *Revista Brasileira de Cartografia*, n.69, p. 731-741, 2017.
- SANTOS, G. G.; NERIS, J. P. F.; SOUSA, J. S.; SILVA, B. K. S.; SILVA, V. S.; FREITAS, T. P. M. Análise espacial e temporal dos focos de calor no município de Anapu, Pará. COINTER PDVAagro, VI Congresso Internacional das Ciências Agrárias. ISSN: 2526-7701. 2021.
- SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima. 2024. Disponível em:<plataforma.seeg.eco.br>. Acesso em: 26/08/2025.
- SCHROEDER, W.; OLIVA, P.; GIGLIO, L.; CSISZAR, I. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment* v. 143, pp.85-96. 2014.
- SILVERMAN, B. W. Estimativa de Densidade para Estatística e Análise de Dados. New York: Chapman e Hall. 1986.
- SODRÉ, G. R. C.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, J. V.; MORAES, B. C. Cálculo de risco e detecção de queimadas: uma análise na Amazônia Oriental. *RBCIAMB*, n.49, set 2018.
- SUN, Q.; MIAO, C.; HANEL, M.; et al. Global heat stress on health, wildfires, and agricultural crops under different levels of climate warming. *Environment International*, v. 128, p. 125-136, July 2019.
- VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; et al. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, n. 23, p. 11707–11735, 2010.
- XAUD, H. A. M.; MARTINS, F. S. R. V.; SANTOS, J. R. Tropical forest degradation by mega-fires in the northern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, v. 294, pp. 97-106, 2013.