REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE $PM_{2.5}$ NO MUNICÍPIO DE ACARÁ/PA, AMAZÔNIA ORIENTAL, DE 1998 A 2023

SPATIOTEMPORAL DYNAMICS OF $PM_{2.5}$ CONCENTRATIONS IN THE MUNICIPALITY OF ACARÁ/PA, EASTERN AMAZON, FROM 1998 TO 2023

DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES DE $PM_{2.5}$ EN EL MUNICIPIO DE ACARÁ/PA, AMAZONÍA ORIENTAL, DE 1998 A 2023

Edson dos Santos Fernandes Junior
Mestre em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia,
Universidade Federal do Pará, Brasil,
E-mail: edsonjr.eng.florestal@gmail.com

Gilmar Wanzeller Siqueira
Doutor em Ciências Naturais, Universidade Federal do Pará, Brasil.
E-mail: gilmar@ufpa.br

Silvia Fernanda Mardegan
Doutora em Ecologia Aplicada,
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: smardegan@ufpa.br

Marco Valério de Albuquerque Vinagre
Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (UFPA),
Universidade da Amazônia (UNAMA), Brasil
E-mail: valeriovinagre@gmail.com

Ronnie Anderson Nascimento de Farias
Doutor em Ciência da Informação, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.
E-mail: ronnie.farias@ebserh.gov.br

Raimundo Nonato Lisboa Clarindo
Doutorando em Ciências e Meio Ambiente (PPGCMA),
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: nonatolisboa@ufpa.br

Thayssa Cristina Santos de Sousa
Graduada em Licenciatura em Geografia,
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: thayssasousa540@gmail.com

Raphael de Lima Wanzeller
Graduando em Engenharia Civil
Faculdade Ideal Wyden (FACI WYDEN), Brasil
E-mail: raphaelwan25@gmail.com

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Manoelson Rodrigues da Silva
Doutorando em Ciências e Meio Ambiente
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: manoelson.rodrigues@cprm.gov.br

Daniel Paulo Serique Junior
Doutorando em Ciências e Meio Ambiente
Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: serique@ufpa.br

Resumo

A poluição atmosférica por material particulado fino ($PM_{2.5}$) constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos, especialmente em regiões submetidas a intensas transformações territoriais. Este estudo teve como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal das concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ no município de Acará/PA, entre 1998 e 2023, e avaliar sua associação com as transformações no uso e cobertura da terra. Foram utilizados dados anuais estimados de $PM_{2.5}$ do *Atmospheric Composition Analysis Group* (ACAG) e informações de uso e cobertura da terra do MapBiomas. A distribuição espacial foi representada por interpolação pelo método *Inverse Distance Weighting* (IDW), enquanto a associação entre $PM_{2.5}$ e as variáveis de uso e cobertura da terra foi avaliada por correlação de Spearman e modelos de Mínimos Quadrados Generalizados (GLS) com estrutura autorregressiva de primeira ordem [AR(1)]. Os resultados evidenciaram três fases distintas: uma fase inicial (1998–2000), com concentrações entre 8,7 e 9,1 µg/m³; uma fase intermediária (2001–2012), com valores entre 13,7 e 19,95 µg/m³; e uma fase recente (2013–2023), caracterizada por concentrações entre 12,3 e 17,65 µg/m³ e maior irregularidade interanual. As médias anuais oscilaram entre aproximadamente 8,5 e 19,6 µg/m³, permanecendo acima do valor-guia anual recomendado pela Organização Mundial da Saúde (5 µg/m³), com concentrações entre 1,7 e 3,9 vezes superiores ao limite de referência. Espacialmente, observou-se um gradiente Norte–Sul, com maiores concentrações nas porções meridionais do município. As análises estatísticas não identificaram associações estatisticamente robustas entre as concentrações anuais de $PM_{2.5}$ e os indicadores de uso e cobertura da terra, indicando que sua variabilidade resulta da interação entre transformações territoriais e processos atmosféricos regionais. Os resultados demonstram o potencial da integração entre sensoriamento remoto, geotecnologias e análises estatísticas para subsidiar o monitoramento da qualidade do ar e o planejamento ambiental em regiões com baixa disponibilidade de estações de medição.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; uso da terra; qualidade do ar; Amazônia.

Abstract

Fine particulate matter ($PM_{2.5}$) air pollution is one of the major contemporary environmental challenges, particularly in regions undergoing intense land-use transformation. This study aimed to analyze the spatiotemporal dynamics of estimated $PM_{2.5}$ concentrations in the municipality of Acará, Pará State, Brazilian Amazon, between 1998 and 2023, and to evaluate their association with land use and land cover changes. Annual $PM_{2.5}$ estimates were obtained from the Atmospheric Composition Analysis Group (ACAG), while land use and land cover data were acquired from the MapBiomas Project. Spatial distribution was represented using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method, whereas the association between $PM_{2.5}$ and land-use variables was assessed through Spearman's rank correlation and Generalized Least Squares (GLS) models with a first-order autoregressive [AR(1)] structure. The results revealed three distinct temporal phases: an initial phase (1998–2000), with concentrations ranging from 8.7 to 9.1 µg/m³; an intermediate phase (2001–2012), with values between 13.7 and 19.95 µg/m³; and a recent phase (2013–2023), characterized by concentrations ranging from 12.3 to 17.65 µg/m³ and greater interannual variability. Annual mean

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

concentrations ranged from approximately 8.5 to 19.6 μg/m³, consistently exceeding the World Health Organization (WHO) annual guideline value (5 μg/m³) by 1.7 to 3.9 times. Spatially, a persistent north–south gradient was identified, with higher concentrations occurring in the southern portion of the municipality. Statistical analyses did not identify robust associations between annual $PM_{2.5}$ concentrations and land use and land cover indicators, suggesting that $PM_{2.5}$ variability results from the interaction between landscape changes and regional atmospheric processes. These findings demonstrate the potential of integrating remote sensing, geospatial technologies, and statistical analyses to support air quality monitoring and environmental planning in regions with limited ground-based monitoring networks.

Keywords: remote sensing; land use; air quality; Amazon.

Resumen

La contaminación atmosférica por material particulado fino ($PM_{2.5}$) constituye uno de los principales desafíos ambientales contemporáneos, especialmente en regiones sometidas a intensas transformaciones territoriales. Este estudio tuvo como objetivo analizar la dinámica espacio-temporal de las concentraciones estimadas de $PM_{2.5}$ en el municipio de Acará, estado de Pará, Amazonia brasileña, entre 1998 y 2023, y evaluar su asociación con los cambios en el uso y la cobertura del suelo. Se utilizaron estimaciones anuales de $PM_{2.5}$ del Atmospheric Composition Analysis Group (ACAG) e información sobre uso y cobertura del suelo del proyecto MapBiomas. La distribución espacial se representó mediante interpolación por el método *Inverse Distance Weighting* (IDW), mientras que la asociación entre $PM_{2.5}$ y las variables de uso del suelo se evaluó mediante la correlación de rangos de Spearman y modelos de Mínimos Cuadrados Generalizados (GLS) con estructura autorregresiva de primer orden [AR(1)]. Los resultados evidenciaron tres fases temporales diferenciadas: una fase inicial (1998–2000), con concentraciones entre 8,7 y 9,1 μg/m³; una fase intermedia (2001–2012), con valores entre 13,7 y 19,95 μg/m³; y una fase reciente (2013–2023), caracterizada por concentraciones entre 12,3 y 17,65 μg/m³ y mayor variabilidad interanual. Las concentraciones medias anuales oscilaron entre aproximadamente 8,5 y 19,6 μg/m³, superando de forma constante el valor guía anual recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (5 μg/m³), con niveles entre 1,7 y 3,9 veces superiores al valor de referencia. Espacialmente, se identificó un gradiente persistente norte-sur, con mayores concentraciones en la porción meridional del municipio. Los análisis estadísticos no identificaron asociaciones estadísticamente robustas entre las concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ y los indicadores de uso y cobertura del suelo, lo que sugiere que la variabilidad del $PM_{2.5}$ resulta de la interacción entre las transformaciones del paisaje y los procesos atmosféricos regionales. Estos resultados demuestran el potencial de integrar sensores remotos, geotecnologías y análisis estadísticos para apoyar el monitoreo de la calidad del aire y la planificación ambiental en regiones con escasa disponibilidad de estaciones de monitoreo.

Palabras clave: teledetección; uso del suelo; calidad del aire; Amazonía.

1. Introdução

A poluição atmosférica por material particulado fino ($PM_{2.5}$) representa um dos principais desafios ambientais da atualidade devido aos seus efeitos sobre a qualidade do ar, o clima e a saúde humana. Em função do reduzido diâmetro aerodinâmico (≤ 2,5 μm), essas partículas permanecem por períodos prolongados na atmosfera e podem ser transportadas por longas distâncias, refletindo tanto emissões locais quanto processos atmosféricos regionais. A distribuição espacial e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

temporal do $PM_{2.5}$ resulta da interação entre fontes de emissão, condições meteorológicas e características da paisagem, tornando seu monitoramento fundamental para a compreensão da dinâmica ambiental e para o planejamento territorial (WHO, 2021; IPCC, 2021).

Na Amazônia, a dinâmica do material particulado apresenta características particulares em razão da intensa transformação da cobertura da terra observada nas últimas décadas. A expansão agropecuária, a abertura de novas áreas, a ocorrência de queimadas, a formação de vegetação secundária e a intensificação da infraestrutura de transportes modificam continuamente os padrões de emissão e dispersão de aerossóis atmosféricos. Além disso, processos atmosféricos de grande escala, como o transporte regional de fumaça durante a estação seca e eventos climáticos extremos associados ao El Niño e ao aquecimento anômalo do Atlântico Tropical, influenciam significativamente as concentrações de partículas em suspensão, mesmo em localidades distantes das principais áreas emissoras.

Apesar da crescente relevância desse tema, o monitoramento da qualidade do ar na Amazônia ainda apresenta importantes limitações decorrentes da baixa densidade de estações convencionais de medição. Essa restrição dificulta a caracterização da variabilidade espacial das concentrações de $PM_{2.5}$, especialmente em municípios de pequeno e médio porte, onde transformações territoriais frequentemente ocorrem de forma acelerada. Nesse contexto, produtos derivados de sensoriamento remoto e modelagem atmosférica, como aqueles disponibilizados pelo Atmospheric Composition Analysis Group (ACAG), têm sido amplamente empregados para análises ambientais em escala regional e local, permitindo a construção de séries históricas consistentes em áreas carentes de monitoramento terrestre.

Paralelamente, o avanço de plataformas de mapeamento anual do uso e cobertura da terra, como o MapBiomas, possibilitou investigar de maneira integrada a evolução das paisagens e sua possível relação com indicadores ambientais. Embora diversos estudos tenham analisado a influência do desmatamento, das queimadas e das mudanças de uso da terra sobre a emissão de aerossóis na Amazônia, ainda são relativamente escassos trabalhos que investiguem a dinâmica

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

espaço-temporal das concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ em escala municipal utilizando séries históricas de longo prazo associadas às transformações da paisagem. Essa abordagem é particularmente relevante para municípios inseridos em regiões de intensa reorganização territorial, onde alterações graduais na cobertura da terra podem modificar os padrões locais de emissão e favorecer maior exposição da população ao material particulado.

O município de Acará, localizado na Amazônia Oriental, constitui um exemplo representativo desse processo. Nas últimas décadas, o município passou por importantes mudanças no uso e cobertura da terra, caracterizadas pela expansão das atividades agropecuárias, redução de áreas florestais e intensificação das atividades produtivas, ao mesmo tempo em que permaneceu sem rede convencional de monitoramento da qualidade do ar. Essa condição oferece uma oportunidade para investigar a evolução das concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ em um contexto de rápida transformação territorial e ampliar o conhecimento sobre a dinâmica ambiental em municípios amazônicos.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal das concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ no município de Acará, Pará, entre 1998 e 2023, bem como avaliar sua associação com as mudanças no uso e cobertura da terra por meio da integração de dados de sensoriamento remoto, geotecnologias e análises estatísticas.

2. Revisão da Literatura

2.1 Mudanças no uso da terra e impactos na concentração de $PM_{2.5}$

As mudanças no uso da terra constituem um dos principais vetores de alteração da qualidade do ar em regiões tropicais, especialmente em áreas submetidas à rápida expansão agropecuária, urbanização dispersa e supressão florestal. A conversão de áreas naturais para atividades produtivas modifica processos ecológicos e atmosféricos, favorecendo emissões diretas e indiretas de $PM_{2.5}$, seja por queimadas, revolvimento do solo, ressuspensão de poeira ou aumento da circulação de veículos e maquinário pesado (Aragão et al., 2018; van Marle et al., 2017).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Em áreas florestais, a retirada da cobertura vegetal reduz a proteção natural do solo, elevando a exposição de partículas minerais à ação do vento e ao tráfego em estradas vicinais, o que potencializa a emissão de poeira inalável. Além disso, o desmatamento geralmente é acompanhado pelo uso do fogo como método de limpeza e preparo da terra, processo historicamente recorrente na Amazônia brasileira. A combustão da biomassa libera grandes quantidades de aerossóis atmosféricos, incluindo carbono negro, compostos orgânicos e partículas finas, que contribuem significativamente para o aumento das concentrações de $PM_{2.5}$ (Andreae, 2019; Reddington et al., 2015).

Na Amazônia Legal, estudos demonstram que anos de maior pressão antrópica sobre a floresta tendem a coincidir com elevação dos focos de calor e deterioração da qualidade do ar, sobretudo durante a estação seca. O transporte regional de fumaça também amplia os impactos, atingindo municípios distantes das áreas diretamente queimadas. Dessa forma, localidades com baixa atividade industrial pode registrar concentrações elevadas de $PM_{2.5}$ em razão de processos ocorridos em outras regiões (Artaxo et al., 2022; Butt et al., 2020).

Outro aspecto relevante refere-se à expansão da infraestrutura viária e da fronteira agrícola. A abertura de estradas e a intensificação logística associada ao agronegócio favorecem emissões fugitivas de poeira, especialmente em vias não pavimentadas, além de estimular novos processos de ocupação territorial. Em municípios amazônicos, esse fenômeno frequentemente desencadeia ciclos sucessivos de desmatamento, queimadas e crescimento urbano desordenado, ampliando a pressão sobre os sistemas ambientais (Barni et al., 2021).

No caso específico do estado do Pará, a dinâmica recente de uso e cobertura da terra tem sido marcada pela expansão da pecuária, agricultura mecanizada, mineração e cultivos permanentes, como o dendê. Essas atividades alteram a paisagem e podem influenciar a composição atmosférica local, seja pelo uso do fogo, movimentação de solo, tráfego intenso ou processamento agroindustrial. Dados do MapBiomas indicam mudanças expressivas na cobertura florestal e no avanço de áreas antropizadas nas últimas décadas, reforçando a necessidade de estudos integrados entre paisagem e qualidade do ar (MapBiomas, 2025).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Assim, compreender a relação entre transformações territoriais e concentrações de $PM_{2.5}$ torna-se fundamental para subsidiar políticas públicas voltadas ao ordenamento territorial, prevenção de queimadas e gestão ambiental municipal. Em territórios amazônicos com limitada rede de monitoramento atmosférico, análises espaço-temporais associadas ao uso da terra representam importante ferramenta para identificar áreas críticas e tendências de degradação ambiental.

2.2 Geotecnologias aplicadas ao monitoramento atmosférico

O uso de geotecnologias tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a estimativa de dados ambientais, permitindo análises mais precisas e abrangentes sobre diferentes ecossistemas e processos naturais. Com o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas (SIG) e modelagem espacial, tornou-se possível monitorar fenômenos ambientais em escalas locais, regionais e globais (Baratto, Albuquerque e Campos, 2025).

O sensoriamento remoto é uma das principais geotecnologias empregadas na obtenção de dados ambientais, possibilitando a aquisição de informações sem a necessidade de contato físico com o objeto estudado (Durat et al., 2021). Os dados coletados por satélites, aeronaves e drones fornecem imagens multiespectrais e hiperespectrais, que permitem a análise da cobertura do solo, monitoramento de desmatamento, avaliação da qualidade da água e estimativas de biomassa e carbono florestal.

No contexto das mudanças climáticas, a utilização de geotecnologias se destaca na análise dos impactos ambientais decorrentes do aquecimento global. Estudos indicam que as emissões de gases de efeito estufa (GEE) alteram significativamente os padrões climáticos, resultando em eventos extremos e degradação ambiental (Paim, 2024). Dessa forma, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) utiliza cenários futuros baseados em modelagens para compreender os efeitos dessas mudanças sobre a biodiversidade e os ecossistemas (IPCC, 2022).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Na região Amazônica, considerada uma das áreas de maior impacto ambiental, diversas pesquisas utilizam geotecnologias para estimar a perda de carbono e biomassa florestal devido ao desmatamento e queimadas (Costa e Quintanilha, 2024), Eventos extremos de precipitação (Fernandes Junior et al., 2025), e concentração de Material Particulado (Couto et al., 2020) entre outros.

Outro campo de aplicação das geotecnologias envolve o monitoramento ambiental em áreas impactadas por empreendimentos industriais, como usinas termelétricas e mineração de carvão (Paim, 2024). A queima de combustíveis fósseis gera emissões significativas de CO_2 e CH_4, contribuindo para o efeito estufa. Para compreender melhor esses impactos, pesquisas têm integrado dados de sensoriamento remoto, índices de vegetação e modelagem atmosférica para estimar os fluxos de carbono entre a biosfera e a atmosfera. Com essa abordagem, torna-se possível quantificar a incorporação de carbono na biomassa e desenvolver modelos preditivos que auxiliam no planejamento ambiental e na mitigação dos impactos climáticos.

Portanto, o uso de geotecnologias na estimativa de dados ambientais tem se mostrado fundamental para o avanço da ciência ambiental e para a formulação de políticas públicas eficazes. A aplicação de ferramentas como SIG, sensoriamento remoto e modelagem espacial permite uma compreensão mais detalhada dos processos ambientais, contribuindo para estratégias de conservação, recuperação de áreas degradadas e monitoramento contínuo das mudanças no meio ambiente.

3. Metodologia

3.1 Área de estudo

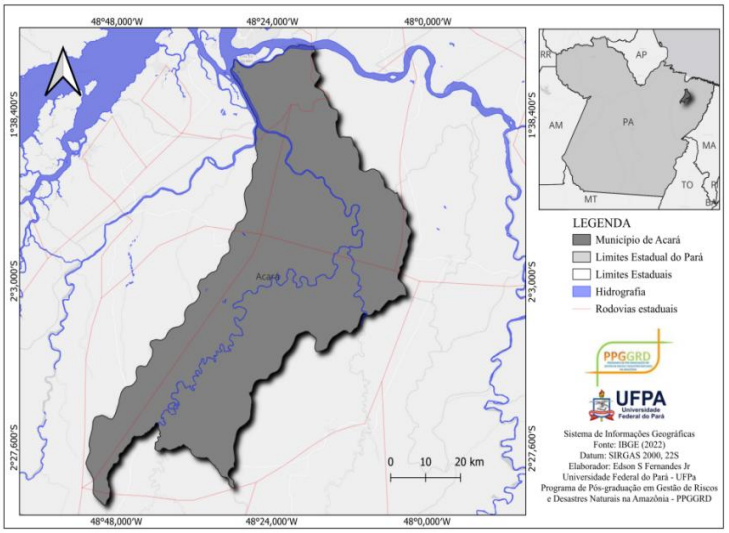
O estudo foi realizado no município de Acará, localizado na mesorregião do Nordeste Paraense, estado do Pará, inserido na Amazônia Legal (Figura 1). O município possui área territorial de 4.334,384 km² e população distribuída em áreas urbanas e rurais, com forte influência das atividades agropecuárias e da cadeia produtiva do dendê. O clima regional, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Af, caracterizado como tropical úmido, com elevadas temperaturas ao longo do ano e regime pluviométrico marcado por período mais chuvoso entre dezembro e maio e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

menos chuvoso entre junho e novembro.

Figura. Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

3.2 Aquisição e processamento dos dados

Os dados de concentração de material particulado fino ($PM_{2.5}$) foram obtidos junto ao Atmospheric Composition Analysis Group (ACAG), vinculado à Washington University in St. Louis, Estados Unidos (https://sites.wustl.edu/acag/surface-pm2-5/). Utilizou-se a série histórica anual referente ao período de 1998 a 2023, com resolução espacial de 0,01° × 0,01°, derivada da integração entre sensoriamento remoto orbital, modelagem atmosférica e calibração com observações terrestres.

As informações de uso e cobertura da terra foram obtidas a partir da plataforma MapBiomas, Coleção 10 (https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/), considerando o mesmo intervalo temporal (1998–2023). Foram analisadas as principais classes de cobertura presentes no município, com destaque para formações florestais, áreas agropecuárias, corpos hídricos e áreas antropizadas.

Os dados espaciais foram processados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), realizando-se o recorte territorial do município de Acará e a padronização cartográfica das bases utilizadas.

As concentrações anuais de $PM_{2.5}$ utilizadas neste estudo correspondem a estimativas produzidas pelo ACAG, obtidas por meio da integração de observações

REMUNOM
ISSN 2178-6925

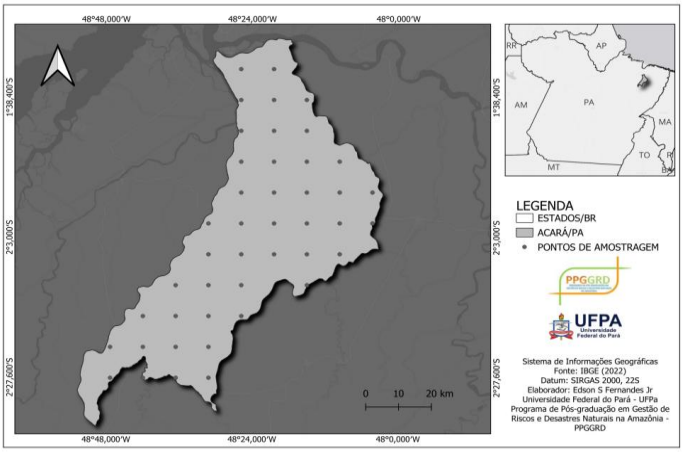
Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

por sensoriamento remoto orbital, modelos de transporte atmosférico e dados de monitoramento em superfície. Dessa forma, os valores representam estimativas espacialmente contínuas e estão sujeitos às incertezas inerentes ao processo de modelagem, especialmente em regiões tropicais com baixa densidade de estações de monitoramento, como a Amazônia. Assim, os resultados devem ser interpretados como estimativas da distribuição espacial do poluente, e não como medições diretas realizadas em campo.

3.3 Procedimento de amostragem, classificação do $PM_{2.5}$ e análise espaço-temporal

Para assegurar uma cobertura espacial homogênea do município de Acará/PA, foi desenvolvida uma malha geográfica sistemática com espaçamento aproximado de 10 km × 10 km, resultando em 44 pontos amostrais distribuídos regularmente em todo o território municipal (Figura 2). A adoção dessa malha teve como objetivo padronizar a amostragem espacial ao longo da série histórica (1998–2023), garantindo comparabilidade entre os anos analisados e uma representação uniforme da área de estudo. Para cada ano da série histórica (1998–2023), os valores de concentração de $PM_{2.5}$ foram extraídos do produto raster do ACAG em cada um dos 44 pontos da malha, por meio da correspondência espacial entre os pontos amostrais e os respectivos pixels do raster. Esse procedimento originou a base de dados utilizada nas análises estatísticas e na representação espacial das concentrações.

Figura 1. Mapa de distribuição de pontos de amostragem.



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

O processamento dos dados, incluindo a leitura dos arquivos NetCDF, a extração dos valores anuais de $PM_{2.5}$ e das informações de uso e cobertura da terra, foi realizado no ambiente estatístico R (versão R-4.6.x). A interpolação espacial pelo método Inverse Distance Weighting (IDW) e a elaboração dos mapas temáticos foram realizadas no software QGIS (versão 3.44 LTR).

A partir dos pontos amostrais definidos, empregou-se o método de interpolação Inverse Distance Weighting (IDW) para a elaboração das superfícies espaciais e dos mapas temáticos de distribuição das concentrações de $PM_{2.5}$. Ressalta-se que a aplicação do IDW teve finalidade exclusivamente cartográfica, visando representar de forma contínua os gradientes espaciais observados entre os pontos amostrados. Assim, a interpolação não teve como objetivo aumentar a resolução espacial do produto ACAG nem produzir novas estimativas das concentrações de $PM_{2.5}$, mas apenas facilitar a visualização e a interpretação dos padrões espaciais identificados no município.

Nesse método, o valor estimado em uma localização S_0 é calculado como uma média ponderada dos valores observados em *n* pontos vizinhos, em que os pesos são função inversa da distância entre o ponto de estimativa e cada ponto amostrado, conforme a Equação 1:

$$Z(s_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Z(s_i)}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^p}} \qquad \text{Eq. (1)}$$

Em que,
$Z(s_0)$ é o valor estimado de $PM_{2.5}$ na localização s_0;
$Z(s_i)$ é o valor observado no ponto amostral i;
d (s_0, s_i) é a distância entre a loxcalização estimada s_0 e o ponto amostral s_i;
n é o número de pontos amostrais utilizados na interpolação;
p é o parâmetro de potência que controla a taxa de decaimento da influência dos pontos com a distância.

Valores mais elevados de *p* aumentam a influência dos pontos mais próximos, tornando a superfície interpolada mais local e heterogênea (Wu et al., 2020; Ghomlaghi; Nasseri; Bayat, 2022).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Embora o produto ACAG apresente natureza raster e distribuição espacial contínua, optou-se pela utilização de uma malha sistemática de pontos como estratégia de padronização da amostragem espacial ao longo da série histórica. Dessa forma, as superfícies interpoladas devem ser interpretadas como representações cartográficas dos gradientes espaciais observados, preservando-se as limitações inerentes ao processo de interpolação de dados derivados de um produto originalmente gradeado.

A partir da interpolação, foram gerados mapas temáticos para anos representativos da série histórica (1998, 2003, 2008, 2013, 2018 e 2023), possibilitando a análise comparativa da distribuição espaço-temporal do $PM_{2.5}$ e da cobertura do solo no município. Essa abordagem permitiu identificar padrões espaço-temporais de distribuição das concentrações de $PM_{2.5}$ e subsidiou a análise de possíveis associações com as transformações territoriais observadas no município.

Para fins de interpretação dos resultados, as concentrações de $PM_{2.5}$ não foram avaliadas com base no Índice de Qualidade do Ar (IQA), uma vez que esse índice é estruturado para aferir a qualidade do ar, medidas em escala horária de 24 h, o que difere da natureza das estimativas utilizadas neste estudo. Assim, adotou-se uma classificação com finalidade exclusivamente metodológica, voltada à identificação de variações espaciais e temporais no município.

Para isso, os dados foram normalizados pelo método min–max, transformando os valores originais para uma escala adimensional entre 0 e 1, conforme a Equação 2:

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad \textbf{Eq.(02)}$$

Em que,
x_i representa o valor observado da variável em determinado momento;
x_{min} corresponde ao menor valor registrado no conjunto de dados; e
x_{max}, indica o maior valor observado.

A normalização permitiu padronizar os dados, reduzir a influência de extremos e comparar diferentes períodos da série histórica. A partir dos valores normalizados, foram definidas quatro classes interpretativas (Tabela 1), utilizadas na elaboração dos mapas temáticos e na análise comparativa da distribuição espacial do poluente.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Tabela 1. Classes interpretativas da concentração relativa de $PM_{2.5}$.

Categoria	Escala	Impactos na Saúde
Muito baixa relativa	0,0 – 0,25	Menores concentrações relativas observadas na série.
Baixa relativa	0,25 - 0,50	Concentrações relativamente baixas
Alta relativa	0,50 - 0,75	Concentrações relativamente elevadas
Muito alta relativa	0,75 - 1,0	Maiores concentrações relativas observadas na série.

Fonte: Elaboração dos autores (2026).

A utilização de técnicas de normalização em estudos ambientais é amplamente empregada para padronização de variáveis e comparação entre diferentes escalas espaciais e temporais, especialmente em contextos com ausência de séries observacionais homogêneas. Embora estudos sobre $PM_{2.5}$ na Amazônia frequentemente utilizem valores absolutos ou padrões normativos, abordagens baseadas em normalização têm sido aplicadas para evidenciar variações relativas e padrões espaciais em análises exploratórias. Nesse sentido, a metodologia adotada permite destacar contrastes intraespaciais e temporais, sem a pretensão de substituir parâmetros regulatórios.

De forma complementar, os resultados também foram interpretados à luz das diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS), considerando o valor de concentração referência anual de 5 μg/m³ para $PM_{2.5}$.

3.4 Análise estatística da associação entre $PM_{2.5}$ e uso e cobertura da terra

Com o objetivo de avaliar a associação entre as concentrações anuais de $PM_{2.5}$ e as transformações no uso e cobertura da terra, foram realizadas análises estatísticas utilizando as séries anuais referentes ao período de 1998 a 2023.

Inicialmente, aplicou-se o coeficiente de correlação de Spearman (ρ), por se tratar de um método não paramétrico adequado para avaliar associações monotônicas entre variáveis ambientais, independentemente da distribuição dos dados.

Considerando que as séries temporais ambientais frequentemente apresentam autocorrelação e tendências temporais, realizou-se adicionalmente

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

análise de correlação parcial, controlando o efeito do tempo (ano), visando verificar se as associações observadas permaneciam após a remoção da tendência temporal comum.

Como etapa complementar, foram ajustados modelos de Regressão por Mínimos Quadrados Generalizados (Generalized Least Squares – GLS), incorporando estrutura autorregressiva de primeira ordem [AR(1)], para modelar a dependência temporal entre observações consecutivas. Os modelos tiveram como variável resposta a concentração anual de $PM_{2.5}$ sendo utilizadas como variáveis explicativas as principais classes de uso e cobertura da terra obtidas pelo MapBiomas.

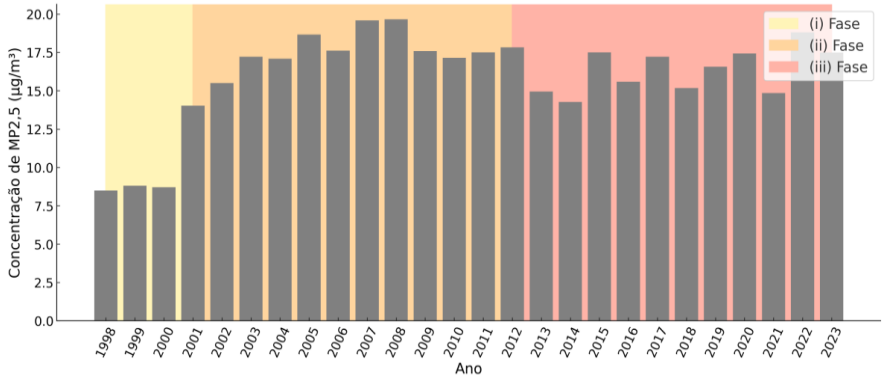
As análises estatísticas foram realizadas no ambiente R (versão R-4.6.x), utilizando os pacotes stats, ppcor e nlme, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

4. Resultados e Discussão

4.1 Dinâmica temporal da concentração de $PM_{2.5}$

A série histórica das concentrações anuais de $PM_{2.5}$ no município de Acará/PA (1998–2023) evidencia mudanças estruturais na dinâmica atmosférica local, compatíveis com a influência de mudanças no uso e cobertura da terra, atividades antrópicas e variabilidade climática, discutidas ao longo desta seção (Figura 3).

Figura 2 - Variação temporal da concentração anual de $PM_{2.5}$ no município de Acará/PA (1998-2023).



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

Com base no comportamento da série temporal, podem ser identificadas três fases distintas: (i) fase inicial, caracterizada por menores concentrações (1998–

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

2000); (ii) fase intermediária, com elevação das médias (2001–2012); e (iii) fase recente, marcada por maior irregularidade interanual (2013–2023).

Essa periodização foi estabelecida com base no comportamento visual da série temporal, sendo utilizada como estratégia interpretativa para discutir a evolução das concentrações ao longo do período analisado, não correspondendo à identificação estatística de pontos de mudança.

Na fase inicial, as concentrações variaram entre 8,7 e 9,1 μg/m³, com baixa variabilidade interanual, caracterizando um período de estabilidade em níveis reduzidos. Na fase intermediária, observaram-se os maiores valores da série, com concentrações entre 13,7 e 19,95 μg/m³, indicando a consolidação de um novo patamar de concentrações mais elevadas ao longo do período. Por fim, na fase recente, as concentrações oscilaram entre 12,3 e 17,65 μg/m³, evidenciando redução em relação à fase anterior, porém com maior irregularidade interanual e ocorrência de picos pontuais.

Os resultados referentes ao final da década de 1990 e início dos anos 2000 sugerem que os baixos níveis de $PM_{2.5}$ são compatíveis com a configuração territorial predominante no período, caracterizada por elevada cobertura florestal, baixa densidade populacional e limitada intensificação de atividades antrópicas. De acordo com o IBGE, o município de Acará apresentava ampla extensão territorial, reduzida densidade demográfica e incipiente expansão urbana nesse período (IBGE, 2000), favorecendo a manutenção de extensos fragmentos de vegetação nativa e reduzindo a presença de potenciais fontes locais de emissão. Nesse contexto, tais características podem ter favorecido menores concentrações de aerossóis e maior capacidade de dispersão atmosférica, contribuindo para as menores concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ observadas na série histórica.

Relatórios institucionais reforçam essa interpretação ao indicar que a base econômica municipal era sustentada principalmente por atividades agroextrativistas tradicionais, agricultura de subsistência e pecuária extensiva de baixa produtividade, sem presença significativa de frentes aceleradas de desmatamento ou uso intensivo do solo (FAPESPA, 2001). Nesse cenário, as emissões antrópicas associadas às atividades produtivas tendiam a ocorrer de forma pontual, vinculadas sobretudo ao

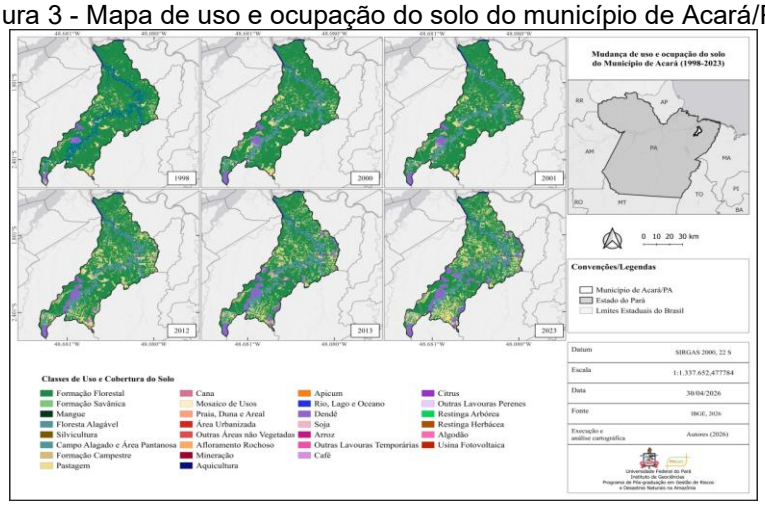
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

manejo tradicional da terra, como o uso ocasional do fogo, e não como fontes contínuas de partículas finas.

As séries históricas de uso e cobertura da terra disponibilizadas pelo MapBiomas (2025) corroboram essa análise ao demonstrar que a classe “Floresta” predominava na maior parte do território municipal, enquanto áreas antrópicas, como pastagens, agricultura consolidada e manchas urbanizadas, apresentavam distribuição reduzida e fragmentada (Figura 4).

Figura 3 - Mapa de uso e ocupação do solo do município de Acará/PA.



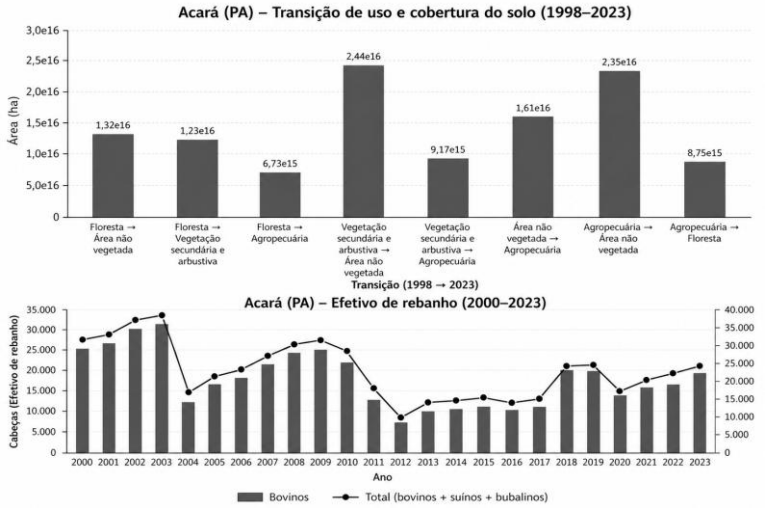
Fonte: Elaboração dos autores (2026).

A partir dos primeiros anos da década de 2000, observa-se uma inflexão no comportamento das concentrações anuais de $PM_{2.5}$, marcando a transição de um regime atmosférico relativamente estável para um sistema mais sensível às pressões antrópicas. Esse processo não se expressa apenas pelo aumento das médias, mas principalmente pela intensificação da variabilidade interanual, indicando maior frequência de episódios extremos. Essa mudança ocorreu concomitantemente às transformações observadas no uso e cobertura do solo no município de Acará e em sua área de influência. Conforme ilustrado na Figura 5, esse processo evidencia que a conversão florestal não ocorre de forma direta para a agropecuária, mas envolve estágios intermediários, como vegetação secundária e áreas não vegetadas, os quais posteriormente são incorporados à matriz produtiva.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Figura 4 - Transições de uso e cobertura do solo e variação do efetivo do rebanho em Acará (PA) entre 1998 e 2023.



Fonte: MapBiomas (2025); IABGE/SIDRA (2026); adaptado pelos autores.

A conversão dessas áreas pode favorecer o aumento das emissões de aerossóis por meio da ocorrência de queimadas, da ressuspensão de partículas e da redução da capacidade de interceptação da vegetação. Esses processos são compatíveis com o aumento das concentrações de $PM_{2.5}$ observado ao longo da série histórica, embora o presente estudo não permita quantificar individualmente a contribuição de cada fator.

Esse comportamento é compatível com o avanço da pecuária extensiva e com a expansão da agricultura familiar descritos por FAPESPA (2010). A abertura de novas áreas, frequentemente associada ao uso do fogo no manejo da vegetação, constitui uma potencial fonte de emissão de material particulado e pode ter contribuído para a elevação das concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ observada a partir desse período. Adicionalmente, a evolução do efetivo do rebanho bovino ao longo dos anos reforça a intensificação das atividades agropecuárias no município, ainda que com variações interanuais, indicando um processo de ocupação territorial dinâmico e não linear.

A partir de 2007, a expansão da cadeia produtiva do dendê passou a constituir um importante vetor de transformação territorial, caracterizado pela conversão de áreas, abertura de infraestrutura e intensificação logística. Essas mudanças podem ter ampliado as fontes potenciais de emissão de partículas finas no município,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

embora sua contribuição específica não tenha sido avaliada diretamente neste estudo.

Embora as médias anuais permaneçam elevadas ao longo da década seguinte, observa-se aumento expressivo da dispersão dos dados, sugerindo maior frequência de episódios extremos e menor previsibilidade do comportamento atmosférico. O ano de 2012 emerge como marco importante desse processo, sinalizando a consolidação de um novo regime de variabilidade do $PM_{2.5}$ no município.

Além da produção empresarial, o projeto incorporou parcerias com agricultores familiares por meio de contratos produtivos, nos quais parte das propriedades rurais era destinada ao cultivo do dendê, com suporte técnico e garantia de compra da produção. Embora apresentado como estratégia de inclusão produtiva, esse modelo também contribuiu para ampliar a presença da monocultura no território e acelerar mudanças no uso da terra. Paralelamente, o uso recorrente do fogo como ferramenta de manejo agrícola passou a exercer papel mais relevante na dinâmica das emissões atmosféricas.

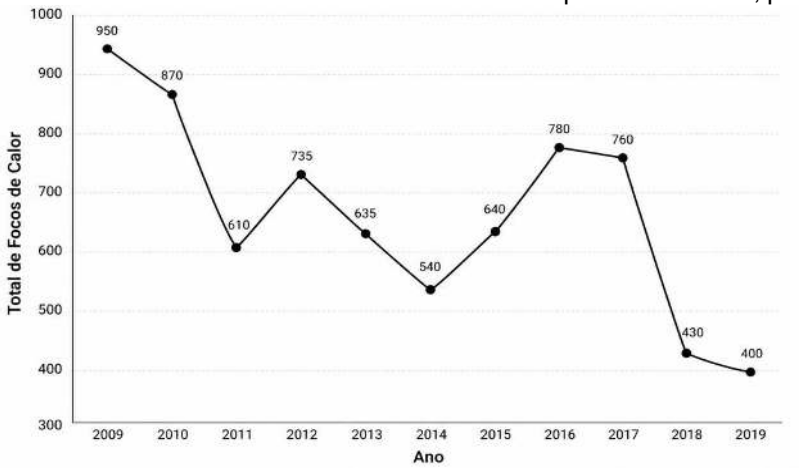
No período de 2014 a 2023, observa-se padrão mais acentuado de instabilidade interanual, caracterizado pela ocorrência recorrente de anos com máximos excepcionais de concentração, com destaque para 2016, 2017, 2019 e 2020. Nesse contexto, os anos extremos observados na fase final da série refletem a atuação sinérgica entre território progressivamente modificado, práticas produtivas consolidadas e efeitos atmosféricos regionais.

Em 2019, o município de Acará registrou aproximadamente 400 focos de calor (Sena et al., 2022) (Figura 6), período que coincide com um dos episódios mais intensos de queimadas na Amazônia recente (Santos et al., 2019; Chikamoto et al., 2023; Lu et al., 2025), evidenciando a influência do transporte regional de poluentes sobre a qualidade do ar local.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Figura 5 - Focos de calor detectados entre 2009 e 2019 no município de Acará/PA, pelo satélite AQUA.



Fonte: Sena *et al*. (2022); INPE (2025); adaptado pelos autores.

Esse resultado reforça que a dinâmica do $PM_{2.5}$ em Acará não é exclusivamente controlada por fontes locais, mas integra um sistema atmosférico regional acoplado, no qual o transporte de fumaça desempenha papel determinante na modulação das concentrações observadas. Estudos sobre a dinâmica atmosférica amazônica demonstram que o transporte regional de fumaça exerce papel decisivo na redistribuição de aerossóis, permitindo que partículas emitidas em áreas distantes sejam transportadas e influenciem a qualidade do ar em municípios como Acará (Pereira et al., 2011; Andreae et al., 2012).

Além disso, esse período foi marcado por eventos climáticos extremos mais frequentes, incluindo secas severas associadas a episódios intensos de El Niño e ao aquecimento anômalo do Atlântico Tropical (Jiménez-Muñoz et al., 2016; Marengo et al., 2024). Essas condições favorecem a permanência de partículas em suspensão na atmosfera ao reduzir a umidade relativa do ar, limitar os processos de deposição úmida e diminuir a altura da camada limite atmosférica, restringindo a dispersão vertical dos poluentes.

Assim, fica evidente que a última fase representa o estágio mais crítico da série histórica, indicando que a dinâmica do material particulado passou a responder não apenas a fatores locais, mas também a processos atmosféricos de escala regional.

A avaliação quantitativa da associação entre as concentrações anuais estimadas de $PM_{2.5}$ e as mudanças no uso e cobertura da terra (Tabela 1) indicou

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

ausência de associações estatisticamente significativas (p > 0,05). Os coeficientes de correlação de Spearman variaram entre −0,22 e 0,32, evidenciando relações fracas entre as variáveis analisadas. De forma complementar, os modelos de regressão por mínimos quadrados generalizados com estrutura autorregressiva de primeira ordem [GLS–AR(1)] produziram resultados consistentes, não identificando associações estatisticamente robustas após o controle da dependência temporal das séries.

Tabela 1. Correlação de Spearman entre $PM_{2.5}$ e os indicadores anuais de uso e cobertura da terra e resultados dos modelos GLS-AR(1) para as principais classes de cobertura da terra.

Variável	Spearman (ρ)	p	GLS-AR(1) β	p
Floresta (ha)	-0,222	0,277	0,00014	0,051
Agricultura (ha)	0,226	0,266	-0,0001	0,062
Pastagem (ha)	0,322	0,109	-3E-05	0,673
Área não vegetada (ha)	0,271	0,18	-0,0017	0,833
Área queimada[1] (ha)	0,001	0,995	—	—
Rebanho bovino[1] (efetivo de rebanho)	0,186	0,363	—	—

[1]Variáveis utilizadas apenas na análise exploratória de correlação de Spearman.

Fonte: Elaboração dos autores (2026).

Os resultados indicam que a variabilidade anual das concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ não pode ser explicada exclusivamente pelas alterações locais no uso e cobertura da terra. Esse comportamento é compatível com a natureza multiescalar da poluição atmosférica na Amazônia, na qual processos locais e regionais atuam simultaneamente sobre as concentrações de aerossóis. Assim, a dinâmica observada em Acará provavelmente resulta da atuação conjunta de mudanças na paisagem, condições meteorológicas, transporte regional de aerossóis e da própria variabilidade temporal do sistema atmosférico.

Em relação a saúde ambiental, a magnitude das concentrações registradas reforça a relevância desse cenário. A OMS estabelece como valor-guia anual para o $PM_{2.5}$ a concentração de 5 μg/m³**.** Entretanto, todas as médias anuais observadas em Acará entre 1998 e 2023 superaram esse limite. Nos períodos analisados, as médias oscilaram entre 8,50 e 17,22 μg/m³ (1998–2003), 14,95 e 19,65 μg/m³ (2008–2013) e 14,85 e 18,80 μg/m³ (2018–2023). O menor valor registrado ocorreu em 1998 (8,50 μg/m³), enquanto o pico máximo foi observado em 2008 (19,65 μg/m³).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Em termos comparativos, esses valores representam concentrações entre 1,7 e 3,9 vezes superiores ao recomendado pela OMS. Esse cenário indica exposição crônica da população a concentrações superiores ao valor-guia anual recomendado pela OMS, reforçando a relevância ambiental do problema, embora o presente estudo não tenha avaliado diretamente indicadores epidemiológicos ou de exposição individual.

As mudanças observadas na dinâmica temporal das concentrações refletem-se diretamente na organização espacial do material particulado, evidenciando padrões territoriais consistentes ao longo do período.

4.2 Dinâmica espacial da concentração de $PM_{2.5}$

Sob a perspectiva espacial, a distribuição das concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ evidencia um padrão espacial recorrente ao longo da série histórica, compatível com as transformações territoriais e socioeconômicas observadas no município de Acará/PA.

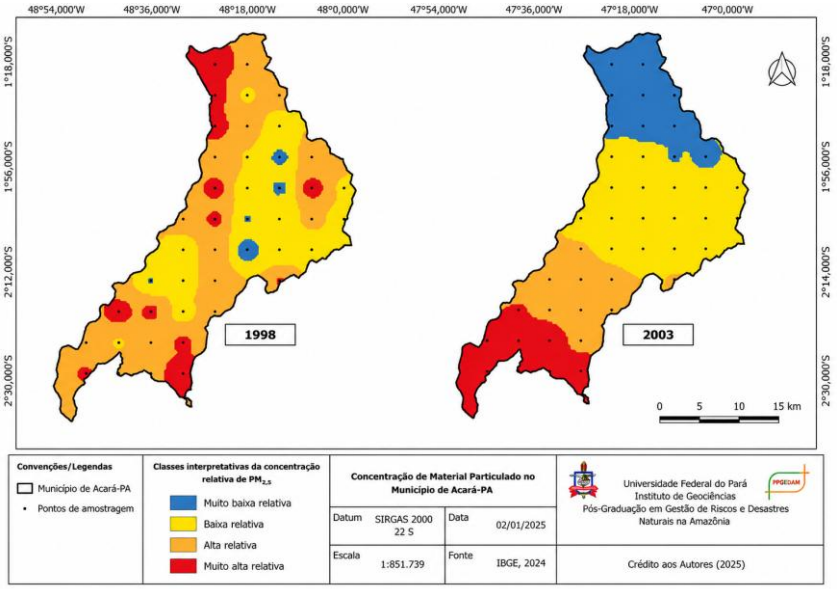
A análise visual dos mapas temáticos evidencia um gradiente espacial recorrente no sentido Norte–Sul, no qual as porções setentrionais apresentaram menores concentrações relativas de $PM_{2.5}$, enquanto o setor Sul concentrou, de forma consistente ao longo da série histórica, as maiores concentrações relativas. Esse padrão é compatível com diferenças no uso e cobertura da terra, na distribuição das atividades produtivas e na conectividade territorial da região, embora a contribuição relativa de cada um desses fatores não tenha sido avaliada individualmente neste estudo.

No período de 1998 a 2003 (Figura 7), predominou a classe Moderada na faixa central, com áreas classificadas como Boa no Norte e concentrações mais elevadas no Sul. Esse comportamento é coerente com a configuração territorial do período, marcada por predomínio florestal, baixa densidade populacional e reduzida urbanização, fatores que contribuíam para menor emissão local de partículas.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Figura 7. Distribuição espacial da concentração de material particulado no município de Acará/PA, período 1998-2003.



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

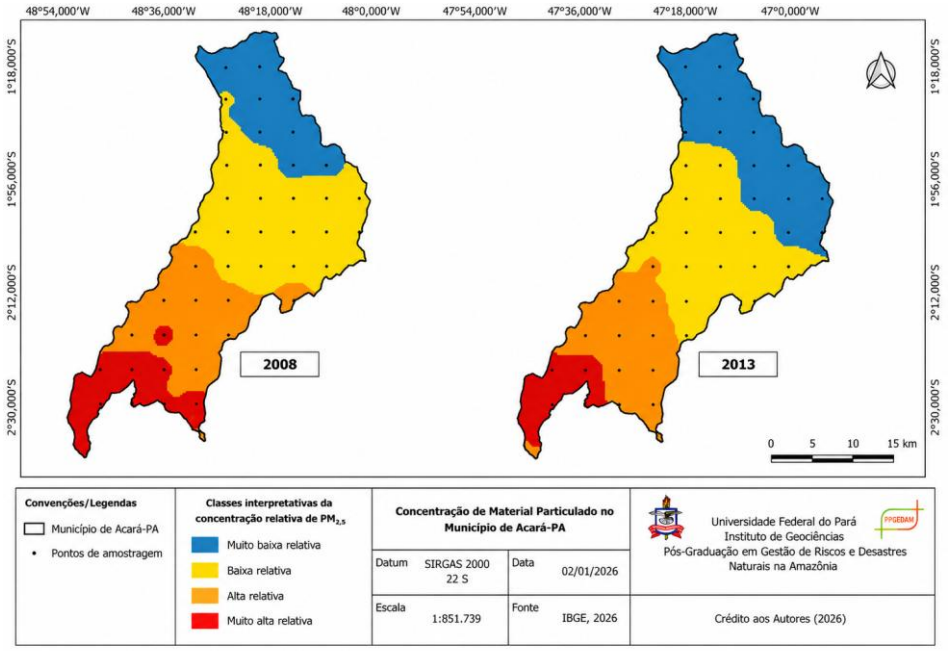
Ao mesmo tempo, o setor Sul já apresentava concentrações relativamente mais elevadas, padrão que pode estar relacionado à maior integração territorial com municípios vizinhos economicamente mais dinâmicos, como Moju, Tailândia e Tomé-Açu, bem como à presença inicial de atividades agropecuárias e de abertura de novas áreas. Entretanto, essa interpretação deve ser compreendida como uma hipótese consistente com o contexto territorial do período, não sendo possível estabelecer relações causais diretas a partir do desenho deste estudo.

Entre 2008 e 2013 (Figura 8), observa-se a consolidação das áreas com maiores concentrações relativas de $PM_{2.5}$ no setor Sul e a manutenção da faixa central em condição intermediária. Esse período coincide com importantes transformações territoriais no município, incluindo o avanço da pecuária extensiva, a expansão da agricultura comercial e a implantação de empreendimentos vinculados à cadeia produtiva do dendê, como a Biopalma, a partir de 2007. Em conjunto, essas mudanças refletem a intensificação do uso e ocupação do solo observada nesse período.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Figura 8. Distribuição espacial da concentração de material particulado no município de Acará/PA, período 2008-2013.



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

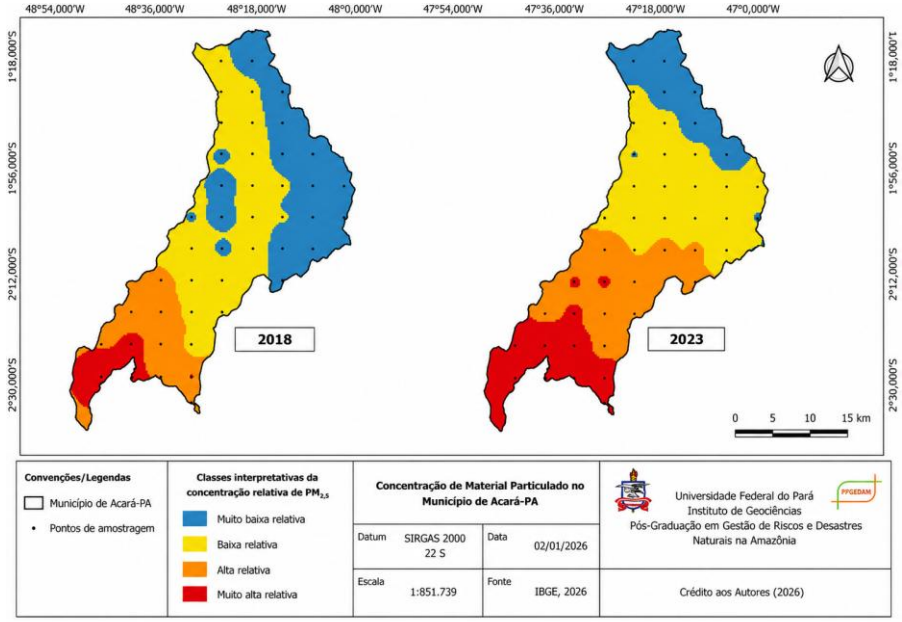
A aquisição de terras, a abertura de acessos, a circulação de maquinário pesado e a expansão da malha viária rural favoreceram processos de supressão vegetal, ressuspensão de poeira em estradas não pavimentadas e aumento da pressão antrópica sobre a paisagem. Paralelamente, o uso recorrente do fogo para limpeza de áreas e manejo agrícola constitui uma potencial fonte de emissão de material particulado, podendo ter contribuído para as maiores concentrações relativas observadas nas áreas meridionais mais conectadas a essa expansão produtiva (CA, 2026).

No período de 2018 a 2023 (Figura 9), o gradiente espacial Norte–Sul permanece evidente, porém com intensificação das áreas classificadas como péssima no Sul em determinados anos.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

Figura 9 - Distribuição espacial da concentração de material particulado no município de Acará/PA, período 2018-2023



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

Esse comportamento é compatível com a consolidação das transformações territoriais observadas nas décadas anteriores, incluindo a continuidade da expansão da cadeia produtiva do dendê, a intensificação da circulação logística e o crescimento populacional do município, evidenciado pelos censos demográficos do IBGE. A ampliação das áreas urbanizadas e das atividades produtivas pode favorecer o aumento das emissões associadas ao tráfego, à movimentação de solo, à geração de resíduos e ao maior consumo energético, somando-se às fontes rurais já existentes.

Além dos fatores locais, os eventos extremos recentes ocorreram em contexto regional marcado por secas severas, queimadas amazônicas e transporte atmosférico de fumaça, o que potencializou os níveis de $PM_{2.5}$ sobre áreas historicamente mais vulneráveis. Estudos desenvolvidos para a Amazônia brasileira demonstram que extensas áreas da região apresentam elevada frequência de dias com má qualidade do ar, especialmente entre agosto e dezembro, período associado ao aumento das queimadas e à intensificação do transporte regional de aerossóis. Esses resultados reforçam a influência multiescalar dos processos atmosféricos sobre a qualidade do ar em municípios amazônicos, incluindo áreas sem

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

monitoramento convencional (Oliveira et al., 2023). Assim, o setor Sul passou a concentrar a combinação entre pressões locais e influência regional, mantendo-se como a porção mais impactada do município.

Em conjunto, os resultados sugerem que a dinâmica das concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ em Acará está associada à atuação conjunta de processos que operam em diferentes escalas, incluindo mudanças no uso e cobertura da terra, intensificação de atividades antrópicas, ocorrência de queimadas e processos atmosféricos regionais. Embora não tenha sido possível quantificar a contribuição individual desses fatores, os resultados evidenciam a complexidade dos processos que influenciam a qualidade do ar em ambientes amazônicos e reforçam a necessidade de abordagens integradas para sua compreensão.

5. Conclusão

O presente estudo caracterizou a dinâmica espaço-temporal das concentrações estimadas de $PM_{2.5}$ no município de Acará/PA entre 1998 e 2023 e avaliou sua associação com as transformações no uso e cobertura da terra. Os resultados evidenciaram que as concentrações anuais variaram entre 8,5 e 19,6 μg/m³, permitindo identificar três fases distintas de comportamento: uma fase inicial (1998–2000), marcada por menores concentrações e relativa estabilidade; uma fase intermediária (2001–2012), caracterizada pelo aumento das concentrações, que atingiram valores de até 19,6 μg/m³; e uma fase recente (2013–2023), na qual se observou maior irregularidade interanual, indicando intensificação da variabilidade temporal do poluente.

Sob a perspectiva espacial, verificou-se a persistência de um gradiente Norte–Sul ao longo de toda a série histórica, com maiores concentrações nas porções meridionais do município. Esse padrão ocorreu concomitantemente às transformações da paisagem observadas no período, caracterizadas pela redução da cobertura florestal, expansão das áreas agrícolas e de pastagem, intensificação das atividades produtivas e aumento da influência de queimadas e processos atmosféricos regionais. Entretanto, as análises estatísticas não identificaram associações estatisticamente robustas entre as concentrações anuais de $PM_{2.5}$ e os

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

indicadores de uso e cobertura da terra, indicando que a variabilidade observada não pode ser explicada exclusivamente pelas alterações locais da paisagem, mas resulta da atuação conjunta de processos ambientais e atmosféricos em diferentes escalas.

Outro aspecto relevante foi a constatação de que todas as concentrações anuais permaneceram acima do valor-guia anual recomendado pela Organização Mundial da Saúde (5 μg/m³), variando entre aproximadamente 1,7 e 3,9 vezes o limite de referência, o que evidencia um cenário persistente de degradação da qualidade do ar, mesmo em um município predominantemente rural e sem monitoramento convencional.

Por fim, os resultados demonstram que a integração entre dados de sensoriamento remoto, geotecnologias e análises estatísticas constitui uma abordagem eficaz para caracterizar a dinâmica espaço-temporal do $PM_{2.5}$ em regiões com limitada disponibilidade de dados observacionais. Os resultados sugerem que a dinâmica do $PM_{2.5}$ na Amazônia decorre da interação entre transformações territoriais e processos atmosféricos regionais, evidenciando a necessidade de abordagens integradas para compreender e monitorar a qualidade do ar em municípios amazônicos sujeitos a rápidas mudanças na paisagem.

Referências

ANDREAE, M. O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, p. 8523–8546, 2019.

ANDREAE, M. O.; ACEVEDO, O. C.; ARAÚJO, A. C.; ARTAXO, P.; et al. (2012). The Amazon Tall Tower Observatory: A unique research facility for observing the Amazon atmosphere. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 12, 15119–15134.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, 2018.

ARTAXO, P. et al. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discussions**, v. 226, p. 235–267, 2022.

BARATTO, P. F. B.; ALBUQUERQUE, J. A.; CAMPOS, C. G. C. Interpolação Espcail: geoprocessamento aplicado à detecção de mudanças climáticas em Santa catarina. **Braziliam Journal of Climatology**, v. 37, p. 225-301, 2025.

BARNI, P. E. et al. Spatial distribution of fires in the Amazon and land-use change dynamics. **Remote Sensing Applications**, v. 22, 2021.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

BUTT, E. W. et al. Large air quality and human health impacts due to Amazon forest and vegetation fires. **Environmental Research Communications**, v. 2, 2020.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. **Inhalable Particulate Matter and Health (PM2,5 and PM10)**. 2026. Disponível em: https://ww2.arb.ca.gov/resources/inhalable-particulate-matter-and-health. Acesso em 07 de mai de 2026.

COSTA, J. D. M. da.; QUINTANILHA, J. A.; Uso das geotecnologias na Estimativa de Biomassa e Carbono Florestal: Uma Revisão, **Rev. Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 2, p. 1127-1146, 2024.

COUTO, L. de O. do.; NUTO, S. de A. S.; HACON, S. de S.; GIODA, A.; SOUSA, F. W. de.; BARREIRA FILHO, E. B.; GONÇALVES, K. dos S.; PÉRISSÉ, A. R. S. Estimativa da concentração média diária de material particulado fino na região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 36, n. 7, p. 1-14, 2020.

DURAT, J. M.; LIMA, A. A. de.; CANALEZ, G. de G.; LOPES, M. A. dos S. B. D. N. Predições de qualidade do ar com base nas estimativas de emissões de gases de efeito local do sistema de transporte de Manaus, Amazonas. **RICA**, v. 12, n. 4, p. 1-14, 2021.

FAPESPA. **Estatística municipal:** Acará. Belém: Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas, 2023. Disponível em: https://www.fapespa.pa.gov.br/wp-content/uploads/2025/02/Acara.pdf. Acesso em: 2 jan. 2026.

FERNANDES JUNIOR, E. dos S.; FRANCO, R. de C. de M.; SODRÉ, G. R. C.; SILVA JUNIOR, J. de A.; RODRIGUES, H. J. B. Analisis of precipitation variability and extreme events in Acará-PA. **Brazilian Jounal of Development**. v. 11, n. 1, p. 1-20, 2025.

GHOMLAGHI, A.; NASSERI, M.; BAYAT, B. How to enhance the inverse distance weighting method to detect the precipitation pattern in a large-scale watershed. **Hydrological Sciences Journal**, v. 67, n. 13, 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATICISTA. **Perfil territorial e demográfico de Acará (área, população, densidade)**, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/acara.html. Acesso em 06 de dezembro de 2024.

IBGE. **SIDRA: Sistema IBGE de Recuperação Automática**. Rio de Janeiro: IBGE, [s. d.]. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/Q. Acesso em: 7 maio 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Relatório 2022**. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/. Acesso em 02 de fev de 2025.

LANDRIGAN, P. J., FULLER, R., ACOSTA, N. J., ADEYI, O., ARNOLD, R., BALDÉ, A. B. The lancet commission on pollution and health. **The lancet**, v. 391, n. 10119, p. 462–512, 2018.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

LIU, Y.; WU, J.; YU, D.; ZHANG, A.; LI, Z. Estimating ground-level PM2.5 concentration using Landsat 8 in Chengdu, China. **Remote Sensing Letters**, v. 6, n. 11, p. 871–880, 2015.

MAPBIOMAS. **Base anual de cobertura e uso da terra (1985-2024)**. [s. l.], [s. n.], Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org. Acesso em: 7 maio 2026.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas** – Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2025. Disponível em: https://mapbiomas.org. Acesso em 05 de maio de 2026.

OLIVEIRA, I. N. de.; OLIVEIRA, B. F. A. de.; SILVEIRA, I. H. da.; MACHADO, L. M. G.; VILARDI, 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. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 39, n. 6, p. 1-12, 2023.

OUR WORLD IN DATA. **Data review: how many people die from air pollution?**. [s. l.], 2022. Disponível em: https://ourworldindata.org/data-review-air-pollution. Acesso em: 2022.

PAIM, B. L. **Estimativa de gases de efeito estufa em área de extração de carvão mineral e empreendimento termelétricos** – Candiota/RS. 97 f. 2024. Tese Doutorado em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2024.

PASTÓRIO, A. F.; SPANHOL, F. A.; MARTINS, L. D.; CAMARGO, E. T. de. Avaliação do Impacto da Temperatura e Umidade em Sensores de Baixo Custo de Material Particulado. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO URBANA (COURB), 6., 2022, Fortaleza. **Anais [...].** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2022. p. 168-181.

PEREIRA, G.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C.; FREITAS, S. R.; CARDOZO, F. S.; LONGO, K. M. Monitoring the transport of biomass bruning emission in South America. **Atmospheric Pollution Resarch**, v. 3, n. 3, p. 247-254, 2011.

REDDINGTON, C. L. et al. Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in Brazil. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 768–771, 2015.

STAVROULAS, I.; GRIVAS, G.; MICHALOPOULOS, P.; LIAKAKOU, E.; BOUGIATIOTI, A.; KALKAVOURAS, P.; FAMELI, K. M.; HATZIANASTASSIOU, N.; MIHALOPOULOS, N.; GERASOPOULOS, E. Field Evaluation of Low-Cost PM Sensors (Purple Air PA-II) **Under Variable Urban Air Quality Conditions**, in Greece. Atmosphere, v. 11, n. 9, p. 926, 2020.

VAN DONKELAAR, A., MARTIN, R. V., BRAUER, M., BOYS, B. L., & colaboradores. Monthly Global Estimates of Fine Particulate Matter and Their Uncertainty. **Environmental Science & Technology**, 2021.

VAN MARLE, M. J. E. et al. Historic global biomass burning emissions for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 10, p. 3329–3357, 2017.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/06/2026 - **Accepted:** 21/07/2026
Vol: 13.16
DOI: 10.66104/xy1v0a38
Pages: 1-29

WHO. **Air pollution**. Genebra: OMS, 2022. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1. Acesso em: 2022.

WU, W.; et al. A Spatial Interpolation of Meteorological Parameters Considering Geographic Semantics. **Advances in Meteorology**, v. 2020, p. 1–14. DOI: 10.1155/2020/9185283. 2020.