

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS INSTITUTO DE EDUCAÇÃO,  
AGRICULTURA E AMBIENTE CAMPUS VALE DO RIO MADEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA AMBIENTAIS**

**MARIANA ARINANA CANUTO PEREIRA**

**POLUIÇÃO POR PM<sub>2,5</sub> E INTERNAÇÕES POR AGRAVOS CARDIORRESPIRATÓRIOS  
EM CRIANÇAS E IDOSOS EM PORTO VELHO, RONDÔNIA: ESTUDO DE SÉRIE  
TEMPORAL**

**HUMAITÁ-AM**

**2026**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS INSTITUTO DE EDUCAÇÃO,  
AGRICULTURA E AMBIENTE CAMPUS VALE DO RIO MADEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA AMBIENTAIS**

**MARIANA ARINANA CANUTO PEREIRA**

**POLUIÇÃO POR PM<sub>2,5</sub> E INTERNAÇÕES POR AGRAVOS CARDIORRESPIRATÓRIOS  
EM CRIANÇAS E IDOSOS EM PORTO VELHO, RONDÔNIA: ESTUDO DE SÉRIE  
TEMPORAL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, área de concentração Ambiente e Sociobiodiversidade, para obtenção do Título de Mestre em Ciências ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Jordeanes do Nascimento Araújo

**HUMAITÁ-AM**

**2026**

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

---

P436p      Pereira, Mariana Arinana Canuto  
              Poluição por pm<sub>2,5</sub> e internações por agravos cardiorrespiratórios em  
              crianças e idosos em porto velho, rondônia: estudo de série temporal /  
              Mariana Arinana Canuto Pereira. - 2026.  
              79 f. : il., color. ; 31 cm.

              Orientador(a): Jordeanes do Nascimento Araújo.  
              Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa  
              de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Humaitá (AM), 2026.

              1. Material Particulado. 2. Poluição do Ar. 3. Estudos de Séries  
              Temporais. 4. Doenças Respiratórias. 5. Incêndios Florestais. I. Araújo,  
              Jordeanes do Nascimento. II. Universidade Federal do Amazonas.  
              Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. III. Título

---

**MARIANA ARINANA CANUTO PEREIRA**

**POLUIÇÃO POR PM<sub>2,5</sub> E INTERNAÇÕES POR AGRAVOS CARDIORRESPIRATÓRIOS  
EM CRIANÇAS E IDOSOS EM PORTO VELHO, RONDÔNIA: ESTUDO DE SÉRIE  
TEMPORAL**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Aprovada em 06 de agosto de 2026.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **JORDEANES DO NASCIMENTO ARAUJO**  
Data: 07/08/2026 12:36:18-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Jordeanes do Nascimento Araújo**  
**Presidente (Orientador) - PPGCA/UFAM**

Documento assinado digitalmente  
 **VIVIANE VIDAL DA SILVA**  
Data: 12/08/2026 08:49:12-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Profa. Dra. Viviane Vidal da Silva**  
**Membro Interno - PPGCA/UFAM**

Documento assinado digitalmente  
 **MATHEUS LUCAS MACIEL LEAL**  
Data: 07/08/2026 19:00:09-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Matheus Lucas Maciel Leal**  
**Membro Externo – UNISAPIENS**

*Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor incondicional e pelos ensinamentos que moldaram quem sou. Aos meus irmãos, pela cumplicidade e pelo apoio de sempre. Ao meu esposo Ricardo, pelo companheirismo, pela paciência e por caminhar ao meu lado em cada etapa desta jornada. Ao meu filho, razão maior de tudo que faço e maior motivação para seguir em frente.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Amazonas e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), pela oportunidade de formação acadêmica e pelo ambiente científico que tornou possível o desenvolvimento desta dissertação. Ao meu orientador, Professor Jordeanes, pela disponibilidade, pela confiança depositada neste trabalho e pela orientação cuidadosa ao longo de toda a trajetória do mestrado. Aos professores do PPGCA, pelas contribuições ao meu crescimento intelectual e pelas reflexões que enriqueceram minha compreensão sobre as Ciências Ambientais na Amazônia.

Aos colegas da turma do PPGCA, pela convivência enriquecedora, pelas trocas de conhecimento e pelo companheirismo que tornaram esta jornada mais leve e significativa. A parceria construída ao longo do curso foi parte essencial desta trajetória.

À minha família, pelo apoio incondicional em cada etapa desta caminhada, pela compreensão nas ausências e pela presença constante que me deu força para continuar. Sem esse suporte, nada disso seria possível. A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho chegasse até aqui, minha sincera gratidão.

## RESUMO

Porto Velho, capital de Rondônia, está entre as cidades amazônicas com maior concentração de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>), decorrente das queimadas intensas no período seco. Este estudo estimou os efeitos de curto prazo do PM<sub>2,5</sub> sobre internações por doenças respiratórias e cardiovasculares em crianças e idosos, em Porto Velho, entre 2016 e 2025, por meio de série temporal de 3.531 dias e modelo de defasagem distribuída não linear com regressão quasi-Poisson. O PM<sub>2,5</sub> esteve associado ao aumento de 5,6% nas internações por asma em crianças para cada incremento de 10 µg/m<sup>3</sup> (IRR = 1,056; IC95%: 1,019–1,094), único desfecho com significância estatística na análise principal. No período chuvoso, observaram-se aumentos expressivos nas internações por infarto e pneumonia em idosos, classificados como achados exploratórios. Os resultados indicam vulnerabilidade seletiva por faixa etária e sazonalidade, reforçando a necessidade de vigilância em saúde ambiental diferenciada ao longo de todo o ano na Amazônia Ocidental.

**Palavras-chave:** Material Particulado. Poluição do Ar. Estudos de Séries Temporais. Doenças Respiratórias. Incêndios Florestais.

## ABSTRACT

Porto Velho, the capital of Rondônia, is among the Amazonian cities with the highest concentrations of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>), driven by intense wildfires during the dry season. This study estimated the short-term effects of PM<sub>2.5</sub> on respiratory and cardiovascular hospitalizations in children and older adults in Porto Velho between 2016 and 2025, using a 3,531-day time series and a distributed lag non-linear model with quasi-Poisson regression. PM<sub>2.5</sub> was associated with a 5.6% increase in asthma hospitalizations in children per 10 µg/m<sup>3</sup> increment (IRR = 1.056; 95%CI: 1.019–1.094), the only outcome with statistical significance in the main analysis. During the rainy season, exploratory increases in infarction and pneumonia hospitalizations were identified in older adults. Findings indicate selective vulnerability by age group and seasonality, reinforcing the need for differentiated environmental health surveillance throughout the year in the Western Amazon.

**Keywords:** Particulate Matter. Air Pollution. Time Series Studies. Respiratory Diseases. Wildfires.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|           |                                                                           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|
| ACE2      | Enzima conversora de angiotensina 2                                       |
| AhR       | Receptor de hidrocarboneto de arila                                       |
| CAMS      | Copernicus Atmosphere Monitoring Service                                  |
| DATASUS   | Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde                     |
| DLNM      | Modelo de Defasagem Distribuída Não Linear                                |
| DPOC      | Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica                                        |
| EAC4      | ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4                                |
| EROs      | Espécies Reativas de Oxigênio                                             |
| ERA5      | ECMWF Reanalysis v5                                                       |
| GAM       | Modelo Aditivo Generalizado                                               |
| GLM       | Modelo Linear Generalizado                                                |
| Gpx1      | Glutathione peroxidase 1                                                  |
| GWAS      | Estudo de Associação Genômica Ampla                                       |
| HO-1      | Heme oxygenase 1                                                          |
| IC95%     | Intervalo de Confiança de 95%                                             |
| IgE       | Imunoglobulina E                                                          |
| IL        | Interleucina                                                              |
| INPE      | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                                 |
| IRR       | Razão de Incidência (Incidence Rate Ratio)                                |
| MMPs      | Metaloproteinases de Matriz                                               |
| MODIS     | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer                             |
| NF-κB     | Fator Nuclear κB                                                          |
| NQO1      | NAD(P)H quinona desidrogenase 1                                           |
| Nrf2      | Fator Nuclear eritroide 2 relacionado ao fator 2                          |
| OMS       | Organização Mundial da Saúde                                              |
| PAHs      | Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos                                   |
| PM2,5     | Material Particulado Fino (diâmetro aerodinâmico $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ) |
| SIH/SUS   | Sistema de Informações Hospitalares do Sistema Único de Saúde             |
| SOD       | Superóxido dismutase                                                      |
| TGF-beta1 | Fator de Crescimento Transformador beta 1                                 |
| TLR       | Receptor Toll-like                                                        |
| TMPRSS2   | Serina protease transmembrana 2                                           |
| TNF-alfa  | Fator de Necrose Tumoral alfa                                             |
| VEF1      | Volume Expiratório Forçado no primeiro segundo                            |

## SUMÁRIO

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                                      | 12 |
| 1.1 Problema                                                              | 13 |
| 1.2 Justificativa                                                         | 14 |
| 1.3 Objetivos                                                             | 15 |
| 1.3.1 Objetivo geral                                                      | 15 |
| 1.3.2 Objetivos específicos                                               | 15 |
| 1.3 Hipóteses                                                             | 15 |
| <b>2. METODOLOGIA</b>                                                     | 16 |
| 2.1 Delineamento do estudo                                                | 16 |
| 2.2 Área de estudo                                                        | 16 |
| 2.3 Fontes de Dados                                                       | 17 |
| 2.3.1 Material Particulado Fino (PM 2,5)                                  | 17 |
| 2.3.2 Dados Meteorológicos                                                | 18 |
| 2.3.3 Focos de Queimadas                                                  | 18 |
| 2.3.4 Dados de Internações hospitalares e óbitos                          | 18 |
| 2.4 Construção de Banco de Dados                                          | 19 |
| 2.5 Análise Descritiva                                                    | 19 |
| 2.6 Análise principal: DLMN com modelo aditivo generalizado quase-Poisson | 20 |
| 2.7 Análise Complementar: GLM quase-Poisson com Lags individuais          | 21 |
| 2.8 Análises de modificação de efeito                                     | 21 |
| 2.8.1 Modificação pelo período seco                                       | 21 |
| 2.8.1 Modificação pela carga de queimadas                                 | 22 |
| 2.9 Análise de Sensibilidade                                              | 22 |
| 2.10 Aspectos Éticos                                                      | 23 |
| 2.11 Softwares utilizados                                                 | 23 |
| <b>CAPÍTULO I. AS QUEIMADAS NA REGIÃO AMAZÔNICA</b>                       | 24 |
| 1.1 Causas e dinâmicas das queimadas                                      | 25 |
| 1.2 Ineficiência das medidas emergenciais e estratégias de controle       | 26 |
| 1.3 Impactos atmosféricos e climáticos sobre a saúde                      | 28 |
| 1.4 Alterações ambientais, modelos climáticos e percepções sociais        | 30 |
| <b>CAPÍTULO II. POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O COMBATE DAS QUEIMADAS</b>       | 37 |
| 2.1 Marco normativo federal                                               | 37 |
| 2.2 O plano de ação para prevenção e controle do desmatamento             | 37 |
| 2.3 Instrumento de financiamento e incentivos à conservação               | 38 |

|                                                                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4 Políticas regionais em Rondônia .....                                                                                    | 39        |
| 2.5 Limitações das políticas existentes e implicações para a saúde da população .....                                        | 39        |
| <b>CAPÍTULO III. . EFEITOS DO PM 2.5 NO SISTEMA RESPIRATÓRIO: INFECÇÕES E DOENÇAS PULMONARES .....</b>                       | <b>41</b> |
| 3.1 Caracterização do Poluente e Vias de Deposição Pulmonar .....                                                            | 41        |
| 3.2 Mecanismo fisiopatológico da Injúria Respiratória Induzida pelo PM 2,5 .....                                             | 41        |
| 3.2.1 Estresse Oxidativo e Inflamação .....                                                                                  | 42        |
| 3.2.2 Comprometimento da Barreira Epitelial e Disfunção Imunológica .....                                                    | 42        |
| 3.2.3 Genotoxicidade e Remodelamento Estrutural Pulmonar.....                                                                | 43        |
| 3.3 PM <sub>2,5</sub> e Suscetibilidade a Infecções Respiratórias .....                                                      | 44        |
| 3.4 PM <sub>2,5</sub> e Exacerbação da Asma .....                                                                            | 44        |
| 3.5 PM <sub>2,5</sub> e Progressão da Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica .....                                               | 45        |
| 3.6 Implicações Clínicas e Epidemiológicas no Contexto Amazônico .....                                                       | 45        |
| 3.7 Síntese do Capítulo.....                                                                                                 | 46        |
| <b>CAPÍTULO IV. VULNERABILIDADE DE CRIANÇAS E IDOSOS Á POLUIÇÃO ATMOSFÉRICAS E ÀS INFECÇÕES RESPIRATÓRIAS SAZONAIS .....</b> | <b>47</b> |
| 4.1 Bases da vulnerabilidade em crianças .....                                                                               | 48        |
| 4.2 Bases da vulnerabilidade em idosos .....                                                                                 | 48        |
| 4.3 Sazonalidade infecciosa no período chuvoso amazônico .....                                                               | 49        |
| 4.4 Mecanismos fisiológicos da vulnerabilidade infantil ao PM <sub>2,5</sub> .....                                           | 50        |
| 4.5 Mecanismos fisiológicos da vulnerabilidade de idosos á pneumonia no período chuvoso .....                                | 51        |
| 4.6 Implicações para vigilância em saúde de grupos vulneráveis .....                                                         | 52        |
| <b>CAPÍTULO V. SAZONALIDADE CLIMÁTICA NA AMAZÔNIA OCIDENTAL .....</b>                                                        | <b>53</b> |
| 5.1 Características climáticas da Amazônia Ocidental e de Porto Velho.....                                                   | 53        |
| 5.2 Porto Velho no contexto do acordo do desmatamento e transporte regional de poluentes .....                               | 54        |
| 5.3 Sazonalidade das queimadas e seus determinantes climáticos e antrópicos .....                                            | 56        |
| 5.4 Sazonalidade infecciosa no período chuvoso amazônico e seus determinantes para saúde.....                                | 56        |
| 5.5 Dualidade sazonal como conceito estruturante para a vigilância em saúde ambiental amazônica .                            | 56        |
| <b>CAPÍTULO VI. RESULTADOS .....</b>                                                                                         | <b>58</b> |
| 6.1 Análise Principal: PM <sub>2,5</sub> e internações por asma em crianças .....                                            | 59        |
| 6.2 Modificações de efeito pela sazonalidade e pela carga de queimadas .....                                                 | 59        |
| <b>CAPÍTULO VII. DISCUSSÃO.....</b>                                                                                          | <b>65</b> |
| 7.1 Síntese dos achados principais .....                                                                                     | 65        |
| 7.2 PM <sub>2,5</sub> e internações por asma em crianças: comparação com a literatura e plausibilidade biológica             |           |

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 7.3 Desfechos cardiovasculares e respiratórios nulos na análise geral: interpretação..... | 66        |
| 7.4 Modificação de efeito por período sazonal e carga de queimadas .....                  | 67        |
| 7.5 Considerações metodológicas: fonte de exposição, modelagem e validade .....           | 68        |
| 7.6 Implicações para políticas de saúde e agenda de pesquisa.....                         | 69        |
| 7.7 Limitações do estudo e agenda de pesquisa .....                                       | 69        |
| <b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                                      | <b>70</b> |
| <b>9. REFERÊNCIAS .....</b>                                                               | <b>72</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Porto Velho, capital de Rondônia, com uma população estimada em cerca de 550 mil habitantes. Localizado às margens do rio Madeira, o município desempenha um papel estratégico na economia regional, impulsionado pela agropecuária, mineração, comércio e infraestrutura energética. Rondônia, por sua vez, integra a Amazônia Legal, uma área de grande importância ambiental e socioeconômica, marcada pelo avanço do desmatamento e pelo crescimento urbano desordenado.

A poluição do ar foi responsável por 7,9 milhões de mortes em 2023, representando uma em cada oito mortes no planeta. Nesse mesmo ano, 232 milhões de anos de vida saudável foram perdidos, e 36% da população mundial respirava ar com PM<sub>2,5</sub> acima do limite mínimo da Organização Mundial da Saúde (Health Effects Institute; IHME, 2025). Porto Velho é parte desse cenário. Os dados acumulados na última década evidenciam que crianças e idosos em Porto Velho constituem grupos de especial vulnerabilidade à exposição ao PM<sub>2,5</sub>, com implicações diretas para a vigilância em saúde ambiental e o planejamento de políticas preventivas na região.

A expansão agrícola e as queimadas frequentes representam desafios para a conservação da floresta e a qualidade de vida da população. Nesse contexto, Porto Velho enfrenta sérios impactos ambientais e de saúde pública, especialmente durante o período de estiagem, quando a poluição do ar se agrava devido às queimadas.

Segundo Sepúlveda (2024), os incêndios florestais na Amazônia brasileira não são desastres naturais, mas sim resultados de fatores históricos, políticos e econômicos, como o desmatamento, a falha de governança e a expansão do agronegócio. O autor destaca que esses incêndios, muitas vezes retratados de forma equivocada, revelam vulnerabilidades sociais, deixando as comunidades afetadas sem os recursos necessários para uma recuperação adequada. O estudo explora caminhos de justiça em desastres para prevenir e gerenciar esses eventos, garantindo a proteção das populações vulneráveis.

A poluição prejudica a saúde respiratória, causando doenças e aumentando as hospitalizações. Pesquisas mostram uma ligação clara entre a exposição a impurezas, especialmente às pequenas partículas do ar (PM<sub>2,5</sub>), e problemas como asma, bronquite crônica e pneumonia. Quando ocorre um evento climático ou meteorológico extremo, surge inevitavelmente a questão de saber se ele foi causado por mudanças climáticas, ou mais especificamente, pela influência das atividades humanas no clima.

Viehmann et al. (2015), descreve em seu estudo que a exposição prolongada ao material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) foi associada ao aumento dos níveis de proteína C reativa de alta sensibilidade (HS-CRP) e à contagem de plaquetas, proporcionando um efeito inflamatório e potencial risco à coagulação sanguínea. O estudo, baseado em dados de uma coorte, utilizou modelos de regressão mistos para analisar essas relações e sugere que os limites atuais de qualidade do ar podem não ser suficientes para proteger a saúde pública.

Segundo Sands et al. (2024), durante a estação seca na região sul da Amazônia, o aumento das emissões de incêndios causados pelo desmatamento eleva a poluição atmosférica, especialmente por gases como monóxido de carbono (CO), formaldeído (HCHO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>),

diretamente associados à variabilidade da área queimada.

Ng et al. (2024), o estudo mostra que, além do desmatamento, a variabilidade climática, como as secas, também influencia os incêndios florestais. Entre 2010 e 2015, a pesquisa utilizou o Global Fire Emission Database (GFED v4) e o modelo GEOS-Chem High Performance (GCHP) para avaliar os efeitos das emissões de incêndios na qualidade do ar e na mortalidade prematura, revelando aumento expressivo de poluentes como PM 2.5, CO, NOx e O3 durante anos de seca. Os resultados reforçam a importância de combater as causas da queima de biomassa, como o desmatamento e as mudanças no uso da terra, para proteger o ambiente e a saúde pública.

A COP 30, que realizada em Belém, Brasil, abordou questões fundamentais relacionadas ao desmatamento e à poluição na Amazônia. A conferência representou uma oportunidade estratégica para o Brasil assumir a liderança nas discussões globais sobre governança ambiental e desenvolvimento sustentável, especialmente diante das crescentes taxas de desmatamento e seus impactos no clima e na qualidade ambiental da região.

Um planeta mais quente contribui diretamente para o aumento da frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos. Tanto as inundações quanto as secas se tornam mais severas, com maior amplitude e durabilidade, à medida que o clima se aquece. Quando ocorre um evento climático extremo, como uma enchente ou seca prolongada, é comum questionar se a mudança climática, especialmente aquela causada pelas atividades humanas, desempenhou um papel. Esse questionamento envolve uma abordagem probabilística, já que a influência da mudança climática antropogênica em tais eventos extremos aumenta a probabilidade de sua ocorrência e intensifica suas características, como a duração e gravidade (VAN OLDENBORGH et al., 2021).

## 1.1 Problema

O material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) é reconhecido como um dos principais determinantes ambientais de morbidade e mortalidade cardiorrespiratória em contextos urbanos. Na Amazônia Ocidental, a cidade de Porto Velho, Rondônia, apresenta dinâmica de exposição singular: durante o período seco (maio a outubro), as queimadas elevam as concentrações de PM<sub>2,5</sub> a níveis que frequentemente ultrapassam os padrões da Organização Mundial da Saúde, enquanto no período chuvoso (novembro a abril) predominam fontes urbanas difusas com concentrações nominalmente menores. Essa variação sazonal na magnitude e na composição química do PM<sub>2,5</sub> sugere que os efeitos sobre a saúde podem não ser homogêneos ao longo do ano, com populações vulneráveis respondendo de forma distinta segundo o contexto de exposição.

Apesar da relevância epidemiológica do tema, há escassez de estudos de série temporal de longa duração na Amazônia Ocidental que examinem simultaneamente múltiplos desfechos cardiorrespiratórios em grupos etários vulneráveis e testem formalmente a modificação de efeito pela sazonalidade. Estudos anteriores, como Coker et al. (2022) e Ye et al. (2021), avançaram na compreensão dos efeitos do PM<sub>2,5</sub> de queimadas no Brasil, mas não exploraram adequadamente a

hipótese de que o período chuvoso possa representar uma janela de vulnerabilidade cardiovascular e respiratória subestimada, tampouco investigaram sistematicamente o efeito do PM<sub>2,5</sub> total sobre internações por asma em crianças na região amazônica.

Qual é o efeito de curto prazo do PM<sub>2,5</sub> sobre as internações respiratórias em crianças e cardiorrespiratórias em idosos em Porto Velho, e esse efeito varia conforme a sazonalidade e a carga de queimadas?

## 1.2 Justificativa

A poluição atmosférica por material particulado fino representa um problema relevante de saúde pública, especialmente em áreas urbanas expostas a fontes sazonais de emissão como queimadas. Na Amazônia Ocidental, esse problema assume características particulares, pois a deterioração da qualidade do ar se intensifica durante o período seco, quando há maior ocorrência de focos de queimadas e condições atmosféricas favoráveis à permanência de poluentes no ambiente. No período chuvoso, a melhora da qualidade do ar não elimina o risco à saúde, pois as condições climáticas favorecem a circulação de agentes infecciosos respiratórios, configurando um cenário de risco dual ainda pouco investigado na literatura sobre saúde ambiental amazônica.

Em Porto Velho, a investigação dessa dualidade sazonal é especialmente pertinente pela recorrência de episódios intensos de queimadas e pela exposição populacional a variações expressivas nas concentrações de PM<sub>2,5</sub>. O material particulado fino possui elevada relevância epidemiológica por permitir penetração profunda no trato respiratório e por sua associação com agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, cenário que se torna ainda mais preocupante em grupos vulneráveis como crianças e idosos. Crianças apresentam maior susceptibilidade pela imaturidade do sistema respiratório e imunológico. Os idosos apresentam vulnerabilidade ampliada pela presença de comorbidades e menor reserva fisiológica, com maior risco de hospitalização tanto por exposição ao PM<sub>2,5</sub> quanto por infecções respiratórias sazonais.

A relação entre exposição ambiental e internações hospitalares pode não ocorrer de forma simples ou simultânea, uma vez que internações dependem de múltiplos fatores, incluindo sazonalidade de infecções, condições climáticas e acesso aos serviços de saúde. Em Porto Velho, onde a exposição ambiental e os determinantes infecciosos operam em períodos distintos do ano, investigar apenas associações diretas no mesmo mês pode subestimar a complexidade dessa relação. A inclusão dos focos de queimadas, da potência radiativa do fogo e da precipitação, além do PM<sub>2,5</sub>, permite caracterizar com maior precisão os dois contextos sazonais e investigar se os períodos de maior carga ambiental coincidem ou se dissociam dos períodos de maior carga hospitalar.

Do ponto de vista científico, o estudo contribui para ampliar a compreensão sobre sazonalidade climática e agravos respiratórios e cardiovasculares em uma capital da Amazônia Ocidental, onde ainda são escassas análises locais que considerem as especificidades ambientais e assistenciais da região. Do ponto de vista da gestão pública, a identificação de qual contexto sazonal representa maior risco de hospitalização para crianças e idosos pode apoiar ações de comunicação de

risco, fortalecimento da atenção primária e organização dos serviços de saúde ao longo de todo o ano, e não apenas nos meses de queimadas. O estudo articula-se ainda à Agenda 2030 das Nações Unidas, especialmente ao ODS 3, Saúde e Bem-Estar, e ao ODS 11, Cidades e Comunidades Sustentáveis, pela relação com a meta 11.6 de redução do impacto ambiental negativo nas cidades com atenção à qualidade do ar.

Este estudo justifica-se, portanto, por sua contribuição acadêmica, sanitária e aplicada: amplia o debate sobre sazonalidade e saúde de grupos vulneráveis em contexto amazônico, caracteriza padrões temporais de risco ao longo de todo o ano e oferece subsídios para o planejamento de ações preventivas diferenciadas para cada período climático em Porto Velho.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo geral**

Analisar a associação entre o PM<sub>2,5</sub> e as internações respiratórias em crianças e cardiorrespiratórias em idosos em Porto Velho (RO), de 2016 a 2025, testando se o efeito muda conforme a estação e as queimadas.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Estimar o efeito de curto prazo do PM<sub>2,5</sub> sobre as internações por asma em crianças e por pneumonia, AVC e infarto em idosos, no efeito acumulado de 0 a 7 dias.
- Explorar se esse efeito é modificado pela sazonalidade (período seco e chuvoso), para os desfechos cardiorrespiratórios, incluindo a pneumonia em crianças.
- Explorar se dias de alta carga de queimadas modificam o efeito do PM<sub>2,5</sub>, com ênfase nas internações por asma em crianças.
- Avaliar a robustez do achado principal por análise de sensibilidade com janela de defasagem ampliada (0 a 14 dias).
- Discutir as implicações dos achados para a vigilância em saúde ambiental em Porto Velho.

### **HIPÓTESES**

- H1: O PM<sub>2,5</sub> está positivamente associado às internações por asma em crianças independente do período sazonal, refletindo vulnerabilidade biológica inerente das vias aéreas pediátricas ao material particulado.
- H2: O efeito do PM<sub>2,5</sub> sobre os desfechos cardiorrespiratórios em idosos é modificado pela sazonalidade, sendo mais pronunciado no período chuvoso, refletindo diferenças na composição química e na toxicidade do PM<sub>2,5</sub> segundo o contexto de emissão predominante.

## **2. MÉTODOS**

### **2.1 Delineamento do estudo**

Trata-se de estudo ecológico de série temporal diária, conduzido no período de 1º de janeiro de 2016 a 31 de agosto de 2025, totalizando 3.531 dias de observação. O delineamento de série temporal é adequado para estimar associações de curto prazo entre exposição ambiental e desfechos de saúde em uma mesma população ao longo do tempo, controlando implicitamente os fatores individuais por meio do próprio desenho longitudinal (GASPARRINI, 2011; DOMINICI et al., 2002). Esta abordagem tem sido amplamente utilizada em estudos sobre PM<sub>2,5</sub> e saúde na Amazônia (COKER et al., 2022; YE et al., 2021; MACHIN et al., 2019).

### **2.2 Área de estudo**

O estudo foi conduzido no município de Porto Velho, capital do estado de Rondônia, localizado na Amazônia Ocidental brasileira (latitude: -8,76°S; longitude: -63,90°O). Porto Velho possui área territorial de 34.090 km<sup>2</sup> e população de 460.434 habitantes recenseada em 2022 (IBGE, 2022), constituindo o maior município em extensão territorial do estado de Rondônia. A cidade concentra expressiva atividade agrícola, pecuária e de extração madeireira, associadas a práticas sistemáticas de queimadas para conversão do uso do solo, especialmente intensificadas durante o período seco (maio a outubro). O contexto amazônico impõe ao município uma dinâmica dual de exposição ao material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>): concentrações elevadas decorrentes das queimadas no período seco e exposição contínua a fontes urbanas difusas ao longo do ano, configurando cenário de especial interesse epidemiológico para o estudo das associações entre qualidade do ar e saúde cardiorrespiratória.

**Figura 1. Localização geográfica de Porto Velho, Rondônia, Brasil.**



Fonte: IBGE (2023). Elaborado pela autora (2026).

## 2.3 Fontes e coleta de dados

### 2.3.1 Material particulado fino ( $PM_{2,5}$ )

Os dados diários de concentração de  $PM_{2,5}$  foram obtidos a partir do modelo de reanálise atmosférica EAC4 do Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), disponibilizado pelo Atmospheric Data Store (ADS) da Agência Espacial Europeia (Copernicus/ECMWF). O CAMS EAC4 fornece estimativas de concentração de aerossóis em resolução temporal horária e resolução espacial de  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ , com cobertura global. Para o presente estudo, foram extraídos os valores correspondentes ao pixel geográfico mais próximo ao centroide urbano de Porto Velho, calculando-se a média diária das estimativas horárias para o período de estudo. O CAMS EAC4 tem demonstrado desempenho satisfatório na estimativa de  $PM_{2,5}$  em regiões amazônicas, onde a limitação de rede de monitoramento terrestre impossibilita o uso de dados observacionais diretos em grandes períodos (COKER et al., 2022; YE et al., 2021).

A concentração média diária de  $PM_{2,5}$  observada no período foi de  $29,44 \mu g/m^3$  (desvio padrão:  $47,29 \mu g/m^3$ ; mínimo:  $0,82 \mu g/m^3$ ; máximo:  $605,14 \mu g/m^3$ ). A distribuição apresentou

assimetria positiva acentuada, característica de séries com presença de episódios extremos de queimadas. A variável de exposição foi tratada como contínua em todas as análises, com o efeito estimado por aumento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , convenção estabelecida na literatura de epidemiologia do PM<sub>2,5</sub> (COKER et al., 2022; YE et al., 2021).

### ***2.3.2 Dados meteorológicos***

Os dados diários de temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa do ar (%) foram obtidos a partir do modelo de reanálise ERA5, desenvolvido pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) e disponibilizado pelo Climate Data Store (CDS) do programa Copernicus. O ERA5 fornece estimativas horárias em resolução espacial de  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ , das quais foram calculadas as médias diárias para o pixel correspondente ao município de Porto Velho. O ERA5 é reconhecido como referência para estudos de epidemiologia ambiental em regiões tropicais com escassez de estações meteorológicas de superfície (YE et al., 2021).

### ***2.3.3 Focos de queimada***

Os dados diários de focos de queimada foram obtidos a partir do programa Fire Information for Resource Management System (FIRMS) da NASA, utilizando o produto MODIS Collection 6.1 (MOD14/MYD14). Foram contabilizados os focos detectados dentro dos limites territoriais do município de Porto Velho para cada dia do período de estudo. A variável de focos de queimada ( $n_{\text{focos}}$ ) foi utilizada para definir a variável binária de alta carga de queimada ( $\text{alta\_queimada}$ ), dicotomizada com base no percentil 75 da distribuição total de focos no período ( $P75 = 4$  focos/dia), classificando os dias em alta carga ( $\text{alta\_queimada} = 1$ ,  $n = 819$  dias) e baixa carga ( $\text{alta\_queimada} = 0$ ,  $n = 2.712$  dias). A dicotomização no P75 segue convenção estabelecida em estudos de modificação de efeito por queimadas na Amazônia (YE et al., 2021).

### ***2.3.4 Dados de internações hospitalares***

Os dados de internações hospitalares foram obtidos do Sistema de Informações Hospitalares do Sistema Único de Saúde (SIH/SUS), disponibilizados pelo Departamento de Informática do SUS (DATASUS) do Ministério da Saúde. Foram incluídas as internações registradas com data de admissão no município de Porto Velho, classificadas segundo a Classificação Internacional de Doenças, 10ª revisão (CID-10), para os seguintes grupos

diagnósticos: pneumonia (J12-J18), asma (J45-J46), acidente vascular cerebral (AVC; I60-I69) e infarto agudo do miocárdio (I21-I23).

Os desfechos foram estratificados por faixa etária em dois grupos: crianças (idade  $\leq 14$  anos) e idosos (idade  $\geq 60$  anos), seguindo critérios estabelecidos em estudos de vulnerabilidade cardiorrespiratória ao PM<sub>2,5</sub> na Amazônia (COKER et al., 2022; YE et al., 2021; MACHIN et al., 2019). Para cada desfecho e faixa etária, foram calculadas as contagens diárias de eventos ocorridos no município de Porto Velho, gerando séries temporais de 3.531 observações. Desfechos com contagem total inferior a 10 eventos no período foram excluídos das análises.

## **2.4 Construção do banco de dados**

O banco de dados final foi construído pela integração de cinco fontes de dados distintas, utilizando a data como chave de ligação. O processo de merge foi realizado no software Stata 17.0, gerando um arquivo analítico único com 3.531 observações diárias e 30 variáveis. O banco final não apresentou valores ausentes (missing) para a variável de exposição principal (PM<sub>2,5</sub> CAMS EAC4), para as variáveis meteorológicas (temperatura e umidade) ou para os desfechos de saúde. A variável de tendência secular (trend) foi calculada como o número de dias transcorridos desde o início do período de estudo (1º de janeiro de 2016), e a variável de dia da semana (dow) foi derivada diretamente da data calendário.

## **2.5 Análise descritiva**

As estatísticas descritivas foram calculadas para todas as variáveis do banco de dados. Para as variáveis contínuas (PM<sub>2,5</sub>, temperatura, umidade e contagens de desfechos), foram calculadas média aritmética, desvio padrão, mediana, percentis (P25, P75) e valores mínimo e máximo. Para as variáveis categóricas (dia da semana, período sazonal e alta\_queimada), foram calculadas frequências absolutas e relativas. A distribuição sazonal das variáveis foi analisada comparando o período seco (maio a outubro, n = 1.779 dias) com o período chuvoso (novembro a abril, n = 1.752 dias). A correlação de Spearman foi calculada para avaliar a associação entre PM<sub>2,5</sub>, temperatura, umidade e focos de queimada, verificando-se ausência de multicolinearidade relevante entre as covariáveis meteorológicas e a exposição (coeficiente de correlação  $< 0,5$ ), conforme recomendado por Coker et al. (2022). As análises descritivas foram realizadas nos softwares Stata 17.0 e R versão 4.5.0.

## 2.6 Análise principal: DLNM com modelo aditivo generalizado quasi-Poisson

A análise principal foi realizada por meio de modelo aditivo generalizado (GAM) com distribuição quasi-Poisson e função de ligação logarítmica, incorporando modelo de defasagem distribuída não linear (DLNM), replicando e estendendo a abordagem de Coker et al. (2022). O DLNM é especialmente adequado para séries temporais de saúde ambiental porque estima simultaneamente o efeito da exposição ao longo de múltiplos dias de defasagem (lags), sem a necessidade de pré-especificação arbitrária de um lag único, por meio de uma estrutura bidimensional denominada cross-basis (GASPARRINI, 2011; GASPARRINI; ARMSTRONG; KENWARD, 2010).

A cross-basis do PM<sub>2,5</sub> foi construída com função linear para a dimensão da exposição e função de spline natural com nós logaritmicamente espaçados (logknots, 3 graus de liberdade) para a dimensão do lag, com janela de defasagem de 0 a 7 dias (lag 0-7), replicando os parâmetros de Coker et al. (2022). O modelo foi especificado da seguinte forma:

$$\log(\mu_t) = cb\_PM2,5 + ns(tendência, 7df/ano) + ns(temperatura, 3df) + ns(umidade, 3df) + dia\_semana$$

onde  $\mu_t$  é o número esperado de eventos no dia  $t$ ;  $cb\_PM2,5$  é a cross-basis do PM<sub>2,5</sub>;  $ns(tendência, 7df/ano)$  é uma spline natural com 7 graus de liberdade por ano de série, controlando a tendência secular e a sazonalidade de longo prazo;  $ns(temperatura, 3df)$  e  $ns(umidade, 3df)$  são splines naturais com 3 graus de liberdade para os confundidores meteorológicos; e  $dia\_semana$  é variável categórica controlando o efeito do dia da semana.

A distribuição quasi-Poisson foi utilizada em lugar da distribuição de Poisson padrão para acomodar a superdispersão característica de dados de contagem de eventos de saúde em séries temporais (DOMINICI et al., 2002). O parâmetro de dispersão ( $\phi$ ) foi estimado a partir dos dados. Os resultados foram expressos como razão de taxas de incidência (IRR, Incidence Rate Ratio) e respectivos intervalos de confiança de 95% (IC 95%) para um aumento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>2,5</sub>, com foco no efeito acumulado na janela de 0 a 7 dias. Valores de IRR acima de 1 indicam aumento no risco de internação associado ao incremento de PM<sub>2,5</sub>; valores abaixo de 1 indicam efeito aparentemente protetor, frequentemente relacionado ao fenômeno de colheita prematura (harvesting). As análises foram realizadas no software R versão 4.5.0, utilizando os pacotes `dlm` e `mgcv`.

## 2.7 Análise complementar: GLM quasi-Poisson com lags individuais

Como checagem de consistência do modelo principal, foi conduzido um modelo linear generalizado (GLM) quasi-Poisson com lags individuais do PM<sub>2,5</sub> (0, 1, 2 e 3 dias) e médias móveis (0-1, 0-2 e 0-3 dias), inspirado na metodologia de Ye et al. (2021), com a mesma especificação de confundidores do modelo DLNM, diferindo apenas pela substituição da cross-basis pela variável de PM<sub>2,5</sub> em um lag ou média móvel por vez. Essa análise teve por finalidade avaliar a robustez da estimativa principal a uma especificação alternativa da exposição; por não constituir um desfecho de reporte independente, seus resultados detalhados não são apresentados em tabela própria.

## 2.8 Análises de modificação de efeito

Foram conduzidas duas análises de modificação de efeito, pré-especificadas com base na literatura de referência, para investigar se a associação entre PM<sub>2,5</sub> e os desfechos cardiorrespiratórios varia conforme o contexto sazonal e a carga de queimadas.

### 2.8.1 Modificação pelo período seco

O efeito modificador do período seco foi avaliado por meio de duas estratégias complementares. Na primeira, o banco de dados foi estratificado em período seco (maio a outubro,  $n = 1.779$  dias) e período chuvoso (novembro a abril,  $n = 1.752$  dias), executando-se modelos DLNM independentes em cada subgrupo. Os IRRs acumulados no lag 0-7 foram comparados entre os dois períodos para os desfechos analisados. Na segunda estratégia, foi construído um modelo com termo de interação explícito, incluindo na equação do GAM uma cross-basis adicional representando o produto entre o PM<sub>2,5</sub> defasado e a variável binária de período seco ( $PM_{2,5} \times período\_seco$ ), conforme descrito por Gasparrini, Armstrong e Kenward (2010). A significância estatística da modificação de efeito foi avaliada pelo teste F de quasi-verossimilhança (quasi-likelihood F-test), obtido pela comparação entre o modelo completo (com o termo de interação) e o modelo reduzido (sem o termo de interação) por meio da função `anova()` do R. Adotou-se nível de significância de  $p < 0,05$  para confirmação da interação, com achados entre  $p < 0,05$  e  $p < 0,10$  classificados como sugestivos e reportados como exploratórios. As análises de modificação de efeito foram conduzidas como análises exploratórias pré-especificadas, e os resultados devem ser interpretados com cautela quanto ao acúmulo de comparações múltiplas.

### **2.8.2 Modificação pela carga de queimadas**

De forma análoga, o efeito modificador da alta carga de queimadas foi avaliado pela estratificação do banco de dados em dias com alta carga ( $\text{alta\_queimada} = 1$ ,  $n_{\text{focos}} > P75$ ,  $n = 819$  dias) e baixa carga de queimadas ( $\text{alta\_queimada} = 0$ ,  $n = 2.712$  dias), com execução de modelos DLNM independentes em cada subgrupo. Paralelamente, foi testado um modelo com o termo de interação  $\text{PM}_{2,5} \times \text{alta\_queimada}$ , avaliado pelo mesmo quasi-likelihood F-test descrito na seção anterior. Esta análise foi conduzida para os desfechos com número de eventos suficiente em ambos os subgrupos, com ênfase nas internações por asma em crianças, em razão da relevância biológica da hipótese de toxicidade diferenciada do  $\text{PM}_{2,5}$  de biomassa sobre as vias aéreas pediátricas (DEFLORIO-BARKER et al., 2019).

### **2.9 Análises de sensibilidade**

Foram conduzidas três análises de sensibilidade para avaliar a robustez dos resultados principais:

(1) Extensão da janela de defasagem para 0 a 14 dias: a cross-basis foi reconstruída com lag máximo de 14 dias e 4 graus de liberdade para o lag, aplicando-se o modelo DLNM para as internações por AVC, infarto e pneumonia em idosos e por asma em crianças. Esta análise permite avaliar a hipótese de colheita prematura (harvesting) em desfechos cardiovasculares em idosos, caracterizada por padrão de IRR decrescente nos lags mais longos, e verificar a consistência do efeito sobre as internações por asma em crianças ao longo de um período de exposição ampliado.

(2) Cálculo do poder estatístico post-hoc: para os desfechos com resultados nulos na análise principal, foi calculado o menor IRR detectável com 80% de poder e nível de significância de 5% (alfa bicaudal), utilizando fórmula aproximada para regressão de Poisson com dispersão quasi, incorporando a média diária do desfecho, o número de dias de série, o desvio padrão do  $\text{PM}_{2,5}$  e o parâmetro de dispersão estimado ( $\phi = 1,2$ ). Esta análise permite distinguir resultados nulos verdadeiros de resultados nulos decorrentes de insuficiência de poder estatístico.

(3) Análise GLM com médias móveis alternativas: foram testadas as médias móveis de 0-1, 0-2 e 0-3 dias como exposição no modelo GLM, comparando os resultados com os obtidos nos lags individuais e verificando a consistência com os achados do DLNM.

## **2.10 Aspectos éticos**

O estudo utilizou exclusivamente dados secundários de domínio público, disponibilizados pelo DATASUS/Ministério da Saúde (SIH/SUS), sem identificação nominal dos indivíduos. Conforme a Resolução CNS nº 510/2016, pesquisas que utilizam apenas informações de domínio público, sem possibilidade de identificação dos sujeitos, estão dispensadas de apreciação pelo sistema CEP/CONEP. Os dados atmosféricos e de queimadas utilizados (CAMS EAC4, ERA5 e NASA FIRMS) são de acesso público e livre. Não há conflito de interesses a declarar.

## **2.11 Softwares utilizados**

As análises estatísticas foram realizadas no software R versão 4.5.0 (R Core Team, 2025), utilizando os pacotes: `dlm` versão 2.4.10 (GASPARRINI, 2011) para a construção dos modelos DLNM; `mgcv` versão 1.9-4 (WOOD, 2017) para os modelos GAM; `splines` (função `ns`) para as splines naturais; `openxlsx` para exportação dos resultados em planilhas eletrônicas; e `dplyr` e `tidyr` para manipulação dos dados. O banco de dados foi construído e gerenciado no software Stata versão 17.0 (StataCorp, College Station, TX, EUA). Os downloads de dados atmosféricos foram realizados por meio das interfaces de programação de aplicativos (APIs) do ADS (`cdsapi`, Python) e do CDS (`cdsapi`, Python). A significância estatística foi definida como  $p < 0,05$  para as análises principais e  $p < 0,10$  para os testes de interação nas análises de modificação de efeito.

## **CAPÍTULO I. AS QUEIMADAS NA REGIÃO AMAZÔNICA E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS**

### **1.1 Causas e dinâmicas das queimadas**

As queimadas, o desmatamento e a expansão agrícola na região Amazônica representam hoje alguns dos principais desafios ambientais, sendo consequências diretas da ação humana. Os incêndios florestais afetam gravemente a biodiversidade, o clima e a qualidade do ar, efeitos que são agravados por condições climáticas adversas, como secas prolongadas. Estudos demonstram que durante a estação seca, há um aumento significativo na emissão de gases poluentes, comprometendo não apenas os ecossistemas locais, mas também a saúde humana. Nesse sentido, embora medidas emergenciais, como a proibição das queimadas, tenham sido implementadas, estas têm se mostrado insuficientes, tornando necessária a adoção de políticas públicas estruturais e de longo prazo. O monitoramento ambiental, o ordenamento territorial e o incentivo a práticas sustentáveis emergem, portanto, como estratégias fundamentais para mitigar os impactos negativos e preservar a floresta.

Segundo Ribeiro et al. (2024), a Amazônia brasileira enfrenta ameaças crescentes relacionadas à intensificação de atividades humanas, ao avanço da monocultura e às mudanças climáticas. Os autores analisaram a relação entre os incêndios florestais, variáveis meteorológicas e hospitalizações por doenças respiratórias na região da Amazônia Legal, entre 2009 e 2019. Utilizando modelos de equações simultâneas com dados oficiais, foi possível estabelecer uma associação significativa entre os incêndios induzidos pelo desmatamento e os agravos à saúde respiratória da população.

Como destacam Gonçalves, Castro e Hacon (2012), as queimadas na Amazônia são, em sua maioria, resultado de ações humanas, especialmente ligadas ao desmatamento para a expansão agropecuária e ao manejo inadequado do uso do fogo. A queima de biomassa florestal, prática histórica na região, tem se intensificado diante da crescente pressão econômica e da ocupação desordenada do território. A própria configuração geográfica e ambiental da Amazônia, aliada ao processo histórico de ocupação, torna o bioma altamente vulnerável a incêndios de grande escala, que podem atingir, anualmente, áreas superiores a dez vezes o tamanho da Costa Rica.

Além dos fatores antrópicos, elementos climáticos como o aumento das temperaturas médias, a redução do volume de chuvas e o prolongamento da estação seca favorecem ainda mais a propagação do fogo. De acordo com Lemos e Cunha (2021), modelos climáticos projetam um aumento no risco de incêndios na Amazônia em decorrência das mudanças climáticas globais, uma vez que a menor umidade do solo e da vegetação cria condições propícias à combustão. A análise espacial dos focos de calor revela que as áreas mais suscetíveis coincidem com regiões de maior desmatamento e uso do solo para fins agrícolas, concentrando-se especialmente no chamado "arco do desmatamento ao sul da Amazônia".

Estudo conduzido por Xu et al. (2021), com base em mais de 300 mil imagens captadas pelo satélite Sentinel-2, revelou que, mesmo em anos sem eventos extremos de seca, como 2019, houve um

aumento expressivo no número de focos de incêndio. Os dados indicam que mais de 90% desses incêndios estavam diretamente ligados à limpeza de áreas previamente desmatadas para uso agrícola. Os autores alertam que sensores com baixa resolução espacial tendem a subestimar a ocorrência dos incêndios, principalmente nas zonas de transição entre floresta e áreas agrícolas — regiões críticas para a formulação de estratégias de conservação.

Já Valente e Laurini (2023), por meio de modelagem estatística com processos de Cox Log-Gaussianos<sup>1</sup>, identificaram padrões espaço-temporais relevantes na ocorrência de incêndios florestais. O estudo apontou uma tendência de queda nos focos de incêndio até 2012, seguida por novo aumento nos anos seguintes, refletindo tanto a atuação (ou ausência) de políticas públicas de governança quanto variações ambientais, como o prolongamento da estação seca. Essa dinâmica ressalta a importância da compreensão integrada desses padrões para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de gestão e controle do fogo.

Na análise de Sands et al. (2024), os incêndios provocados pelo desmatamento contribuem significativamente para a deterioração da qualidade do ar, elevando as emissões de poluentes atmosféricos como monóxido de carbono (CO), formaldeído (HCHO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). Essas emissões tendem a se concentrar durante o pico da estação seca, estando diretamente relacionadas à extensão das áreas queimadas e ao tipo de cobertura vegetal impactada.

A pesquisa de Garzón et al. (2022) evidencia a formação de um novo arco de desmatamento no estado de Rondônia, impulsionado por atividades como a extração de madeira, a mineração e a expansão da fronteira agrícola voltada para a produção de commodities. Esse avanço ameaça diretamente unidades de conservação e territórios indígenas, ao mesmo tempo em que é favorecido por mudanças regulatórias que atendem a interesses econômicos. Os autores também destacam a presença crescente de forças militares na região, contribuindo para o fortalecimento de práticas neoextrativistas<sup>2</sup>. Além disso, enfatizam a importância do mapeamento territorial e da construção de cartografias sociais como instrumentos fundamentais para compreender as dinâmicas de ocupação e seus efeitos sobre os povos indígenas e o meio ambiente.

Em estudo voltado para a Amazônia nordestina, Santana, Vasconcelos e Mariano-Neto (2022) analisaram os padrões recentes de incêndios e projetaram os chamados “nichos de fogo”<sup>3</sup> futuros. Utilizando o método de entropia máxima, o estudo concluiu que há maior suscetibilidade ao fogo em áreas de uso agrícola e savanas. As projeções climáticas indicam que um ambiente mais quente e seco

---

<sup>1</sup> Os processos de **Cox Log-Gaussianos** combinam a aleatoriedade de processos pontuais com a variação contínua de campos gaussianos log-transformados, permitindo identificar áreas e períodos com maior propensão à ocorrência de incêndios, mesmo sob condições ambientais variáveis.

<sup>2</sup> **Neoextrativismo** é um modelo de desenvolvimento centrado na extração intensiva de recursos naturais, com baixa diversificação econômica e dependência de redes globais de exportação.

<sup>3</sup> “**Nichos de fogo**” são áreas geográficas onde as condições ambientais, climáticas e de uso do solo favorecem a ocorrência e propagação de incêndios florestais, de forma semelhante ao conceito ecológico de “nicho”

pode intensificar os incêndios, mesmo na ausência de alterações significativas na cobertura vegetal, fornecendo subsídios importantes para o planejamento de ações de manejo e adaptação.

Assim, a compreensão integrada das causas e dinâmicas das queimadas na Amazônia, considerando as complexas interações entre fatores antrópicos, climáticos e sociais, é essencial para a formulação de políticas públicas eficazes. A adoção de medidas como o monitoramento contínuo, o ordenamento territorial responsável e o fomento a práticas produtivas sustentáveis são caminhos indispensáveis para a redução dos impactos ambientais, a proteção da biodiversidade e a promoção da saúde das populações locais, assegurando a preservação do bioma amazônico frente aos desafios contemporâneos.

## **1.2 Ineficiência das medidas emergenciais e estratégias de controle**

A intensificação dos incêndios na Amazônia expõe as limitações das respostas emergenciais tradicionalmente adotadas para conter o avanço do fogo. A adoção de medidas pontuais tem se mostrado insuficiente frente às múltiplas pressões ambientais, como o desmatamento, a expansão agrícola e os eventos climáticos extremos. Neste contexto, cresce a necessidade de estratégias integradas e duradouras, capazes de enfrentar as causas estruturais da crise e promover uma gestão territorial mais eficaz e preventiva.

Berenguer et al. (2024) destacam que, nos últimos anos, os incêndios na Amazônia têm se tornado mais frequentes e intensos, revelando a limitação das medidas emergenciais adotadas até o momento. ações pontuais, como a proibição temporária de queimadas, não são suficientes para conter o avanço do fogo, especialmente diante de fatores como o desmatamento contínuo, eventos climáticos extremos e a expansão de atividades humanas.

Andela et al. (2022) analisaram a temporada de incêndios de 2019 na Amazônia e evidenciaram que a maioria das emissões de carbono foi provocada por incêndios de desmatamento e queimadas de longa duração. A abordagem quase em tempo real permitiu identificar rapidamente o tipo de incêndio, o que pode otimizar ações de resposta. Incêndios florestais descontrolados chegaram a queimar por semanas, agravando os impactos ambientais. Os autores destacam, portanto, a importância do uso de tecnologias de monitoramento como ferramenta essencial para a gestão eficiente em situações emergenciais.

Ribeiro et al., (2024) relatam que as queimadas registradas em 2024 na Amazônia resultam de uma combinação crítica entre eventos climáticos extremos e ações humanas deliberadas. A intensa seca iniciada em 2022, agravada pelo fenômeno El Niño, reduziu drasticamente a umidade e aumentou a inflamabilidade da vegetação. Apesar da redução no desmatamento ilegal em comparação a anos anteriores, práticas como a grilagem e a expansão agrícola continuam impulsionando os focos de incêndio. A fraca fiscalização agrava ainda mais esse cenário, demonstrando a vulnerabilidade das políticas atuais de controle.

Custodio e Abeledo (2023) desenvolveram um modelo de localização-alocação voltado ao uso

estratégico de drones para otimizar a resposta a emergências ambientais em contextos de recursos limitados. A proposta busca reduzir custos operacionais e melhorar o desempenho em regiões críticas, como Ji-Paraná, na Amazônia brasileira. O estudo utilizou dados de denúncias por aplicativo e imagens de satélite para identificar demandas reais. Os resultados demonstram que a tecnologia pode apoiar decisões rápidas e eficazes no enfrentamento de incêndios e desmatamento.

Dutra et al., (2024) apontam que a região de Boca do Acre apresenta uma crescente suscetibilidade ao fogo devido ao desmatamento e à manipulação florestal, fatores agravados pela expansão agrícola e por práticas insustentáveis. O estudo destaca a necessidade urgente de medidas preventivas e de uma gestão eficaz do fogo antes de 2030, com base em análises de adequação realizadas por meio do algoritmo MAXENT <sup>4</sup> no software R. A identificação de áreas mais vulneráveis permite ações de planejamento mais direcionadas e assertivas.

Salazar (2018) observa que o Bioma Amazônia, anteriormente considerado um importante sumidouro de carbono, tem se transformado em uma fonte significativa de emissões, sobretudo em decorrência do aumento dos incêndios florestais. Através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e modelos de regressão geograficamente ponderada, foi possível identificar padrões espaciais distintos e fatores ambientais e antrópicos relacionados à frequência de focos de calor. Elevação, temperatura, desmatamento e fragmentação florestal destacaram-se como variáveis-chave para explicar a distribuição dos incêndios, reforçando a importância de uma gestão territorial baseada em evidências científicas.

Saravia et al. (2025) alertam que o desmatamento e as mudanças climáticas podem aumentar significativamente a frequência e a intensidade dos incêndios na Amazônia. Os autores afirmam que interromper o desmatamento é essencial para evitar situações extremas, como mega incêndios e a possível extinção de áreas florestais. A pesquisa utilizou um modelo simples de incêndios florestais, parametrizado com dados de sensoriamento remoto, para analisar mudanças potenciais no regime de fogo da região, oferecendo subsídios para políticas públicas preventivas.

Salazar (2018) reforça que a Amazônia, outrora reconhecida como um importante sumidouro de carbono, tem progressivamente se transformado em uma fonte expressiva de emissões devido ao avanço dos incêndios florestais. Nesse contexto, torna-se urgente adotar uma gestão territorial fundamentada em dados científicos, capaz de reduzir os impactos ambientais e climáticos.

Saravia et al. (2025) enfatizam que o controle efetivo do desmatamento é crucial para prevenir incêndios de grande escala e a perda permanente de áreas de floresta, reiterando a importância de

---

<sup>4</sup> <sup>4</sup> O algoritmo **MAXENT** (Maximum Entropy, ou Máxima Entropia) é uma técnica estatística amplamente utilizada para modelagem de distribuição espacial de espécies ou eventos, com base em dados de ocorrência e variáveis ambientais. O MAXENT estima a probabilidade de ocorrência de um evento (ex.: fogo) com base em um conjunto de variáveis ambientais (como temperatura, uso da terra, umidade, relevo, entre outras).

políticas públicas estruturadas que aliem o combate ao fogo à conservação do ecossistema.

Os autores ressaltam que medidas emergenciais, como as proibições de incêndio, não são suficientes para controlar as crises de fogo na Amazônia, e reforçam a importância de abordagens duradouras que envolvam a gestão da paisagem e o engajamento das populações locais.

Diante disso, torna-se evidente que medidas emergenciais isoladas não são suficientes. É necessário promover uma transformação no modelo de atuação, substituindo respostas imediatistas por estratégias articuladas, duradouras e preventivas, que integrem o uso de tecnologias, uma governança sólida e a participação ativa das comunidades locais, assegurando a proteção e a sustentabilidade da Amazônia em longo prazo.

### **1.3 Impactos atmosféricos, climáticos e sobre a saúde**

De acordo com Jiang (2023), os incêndios na Amazônia geram sérios impactos atmosféricos, climáticos e à saúde humana, especialmente durante a estação seca. A queima de biomassa eleva a poluição do ar com substâncias tóxicas como PM<sub>2.5</sub> e CO, contribuindo para milhares de mortes prematuras. Além disso, há alterações em gases como o sulfeto de carbonila (OCS)<sup>5</sup>, devido à redução da absorção pela vegetação.

Urrutia-Pereira et al., (2021) e Mendes et al., (2017) ressaltam que populações vulneráveis são particularmente afetadas, e que a escassez de estudos específicos na região reforça a necessidade de políticas públicas eficazes.

Jiang (2023), com base em dados do Espectrômetro de Emissão Troposférica (TES), analisou as variações de sulfeto de carbonila (OCS) na Amazônia e observou que, durante a estação seca (agosto a outubro), as concentrações desse gás apresentaram anomalias positivas de aproximadamente 16 ppt nas regiões central e sul, em comparação com a estação chuvosa (janeiro a março). Esse aumento foi atribuído à menor absorção de OCS pela vegetação e pelo solo, à maior liberação decorrente da queima de biomassa e ao movimento descendente do ar característico do período seco, que favorece o acúmulo do gás na atmosfera. As simulações realizadas com o modelo MOZART-4<sup>6</sup> confirmaram esses resultados, contribuindo para aprofundar a compreensão das variações do OCS e sua relação com a atividade fotossintética na região.

Segundo Butt et al., (2020), em 2012, os incêndios na vegetação da Bacia Amazônica foram responsáveis por mais de 80% da concentração de PM<sub>2.5</sub> durante a estação seca, gerando impactos expressivos na saúde pública. A pesquisa estimou que a prevenção desses incêndios poderia ter evitado cerca de 16.800 mortes prematuras na América do Sul, especialmente na Bolívia e nos estados

---

<sup>5</sup> O OCS é a sigla para sulfeto de carbonila (carbonyl sulfide, em inglês), um gás traço presente na atmosfera em baixas concentrações, mas com grande importância para estudos climáticos e ecológicos.

<sup>6</sup> O MOZART-4 (Model for Ozone and Related Chemical Tracers, versão 4) é um modelo numérico de química atmosférica tridimensional desenvolvido para simular a distribuição e o transporte de gases traços (como ozônio, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis) na atmosfera global.

brasileiros de Rondônia, Acre e Mato Grosso. Os autores comparam os benefícios à saúde com os observados em regiões como a Ásia Equatorial.

Para Ng et al., (2024), a queima de biomassa na Bacia Amazônica afeta intensamente o clima e a qualidade do ar, sobretudo em anos de seca, ampliando os riscos à saúde humana. O estudo indica que entre 2010 e 2015, as emissões de poluentes como PM<sub>2.5</sub>,<sup>7</sup> CO, NO<sub>x</sub> e O<sub>3</sub> aumentaram significativamente, associando-se a uma estimativa de 8.500 a 10.400 mortes prematuras por ano. Os efeitos são mais severos no sudeste da Amazônia e em áreas sob influência dos ventos predominantes. Os autores destacam a importância de medidas que enfrentem conjuntamente o desmatamento e a variabilidade climática.

Segundo Liu e Matsui (2023), as mudanças climáticas afetam significativamente a variabilidade das partículas em suspensão (MP) no ar, alterando suas fontes, distribuição e tempo de vida. As anomalias climáticas influenciam a erosão eólica, incêndios florestais e processos biológicos naturais. Além disso, as MP interagem com o clima por meio de efeitos radiativos e processos em nuvens. A compreensão desses mecanismos é essencial para melhorar as projeções em modelos climáticos.

Conforme destacam Sands et al., (2024), durante a estação seca na região sul da Amazônia, as emissões provenientes dos incêndios causados pelo desmatamento intensificam a poluição atmosférica. Os principais gases liberados são o monóxido de carbono (CO), formaldeído (HCHO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), diretamente associados à variabilidade da área queimada.

Em uma revisão de literatura, Urrutia-Pereira et al., (2021) buscaram compreender os impactos da exposição à fumaça da queima de biomassa na saúde humana na Amazônia, com base em artigos publicados entre 2005 e 2021. O estudo evidenciou uma escassez de pesquisas específicas sobre os efeitos na população local, apesar da gravidade do problema. Os autores ressaltam a urgência de políticas públicas voltadas à proteção das populações mais vulneráveis, além da necessidade de ampliação do conhecimento científico sobre os riscos da poluição.

De acordo com Moura et al. (2024), os incêndios florestais no ecótono Cerrado-Amazônia, especialmente na cidade de Sinop, degradam significativamente a qualidade do ar. O estudo mostra que os níveis de ozônio aumentam logo após os incêndios, enquanto as concentrações de material particulado (PM) se elevam posteriormente, prolongando os efeitos adversos à saúde. A pesquisa utilizou modelagem atmosférica, monitoramento do solo e análises estatísticas para compreender as variações dos poluentes e os fatores meteorológicos associados.

Por fim, Mendes et al. (2017) afirmam que, embora a prática de queimadas na agricultura seja uma solução rápida e de baixo custo para o preparo do solo, ela acarreta severas externalidades

---

<sup>7</sup> PM<sub>2.5</sub>: partículas inaláveis com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros, associadas a doenças respiratórias e cardiovasculares. CO: monóxido de carbono, gás tóxico que reduz a oxigenação do sangue. NO<sub>x</sub>: óxidos de nitrogênio, irritantes respiratórios e precursores de ozônio. O<sub>3</sub>: ozônio troposférico, poluente secundário nocivo à saúde e à vegetação.

negativas. Ao negligenciar os custos associados à saúde pública e à degradação ambiental, essa prática torna-se economicamente atrativa no curto prazo, mas socialmente insustentável. Os autores também ressaltam que avaliar os efeitos das partículas emitidas sobre a saúde humana, especialmente em grupos vulneráveis como crianças e idosos, é uma tarefa complexa, dada a interação de múltiplos fatores socioeconômicos, clínicos, epidemiológicos e ambientais.

#### **1.4 Alterações ambientais, modelos climáticos e percepções sociais**

As queimadas na Amazônia resultam da complexa interação entre pressões humanas e mudanças climáticas, comprometendo o equilíbrio ambiental e transformando a floresta de sumidouro em fonte de emissões de carbono (Csillik et al., 2024; IPCC, 2023). A intensificação das secas e o avanço do desmatamento aumentam significativamente a vulnerabilidade da região ao fogo. Tecnologias como o sensoriamento remoto têm contribuído para o mapeamento de áreas de risco, mas ainda há deficiências na incorporação desse conhecimento em políticas públicas eficazes. Enquanto isso, as populações Tradicionais permanecem entre as mais afetadas, ressaltando a urgência de ações integradas, justas e sustentáveis para a proteção da floresta e de seus povos.

Csillik et al. (2024) analisaram o balanço de carbono na Amazônia e identificaram que a floresta emitiu mais carbono do que absorveu, principalmente devido ao desmatamento e outras perturbações. O estudo, baseado em varredura a laser aerotransportada de alta resolução, revelou que 4,2% da área demonstrada foi impactada por atividades humanas, enquanto quedas de vento e outros distúrbios afetaram 2,7% e 14,7%, respectivamente. Esses achados destacam a importância da gestão florestal para a manutenção do equilíbrio de carbono na Amazônia.

Jiang et al. (2021) demonstraram que os incêndios na Amazônia impactam diretamente os ciclos de carbono, elevando as concentrações de CO<sub>2</sub> durante a estação de fogo. Esse aumento está relacionado à queima de biomassa, à presença de ar descendente e à redução da precipitação, especialmente na porção oriental da floresta. As condições meteorológicas predominantes favorecem a intensificação dos incêndios. Os resultados do estudo contribuem para uma compreensão mais aprofundada sobre as dinâmicas de emissões e sumidouros de carbono na região amazônica.

Eleutério et al., (2024) concentraram seu estudo na identificação de áreas afetadas por incêndios florestais na Floresta Amazônica, com ênfase no estado do Amazonas, onde a ocorrência desses eventos tem aumentado significativamente nos últimos anos. A pesquisa utilizou redes neurais convolucionais (CNN)<sup>8</sup> aplicadas a imagens de satélite obtidas pelos sensores Landsat<sup>9</sup> 8 e 9 . Os resultados

---

<sup>8</sup> As CNNs (Convolutional Neural Networks), ou Redes Neurais Convolucionais, são um tipo de arquitetura de redes neurais artificiais amplamente utilizada no reconhecimento e na análise de imagens. Elas foram inspiradas no funcionamento do sistema visual de seres vivos e são particularmente eficazes para identificar padrões visuais, como formas, texturas e cores.

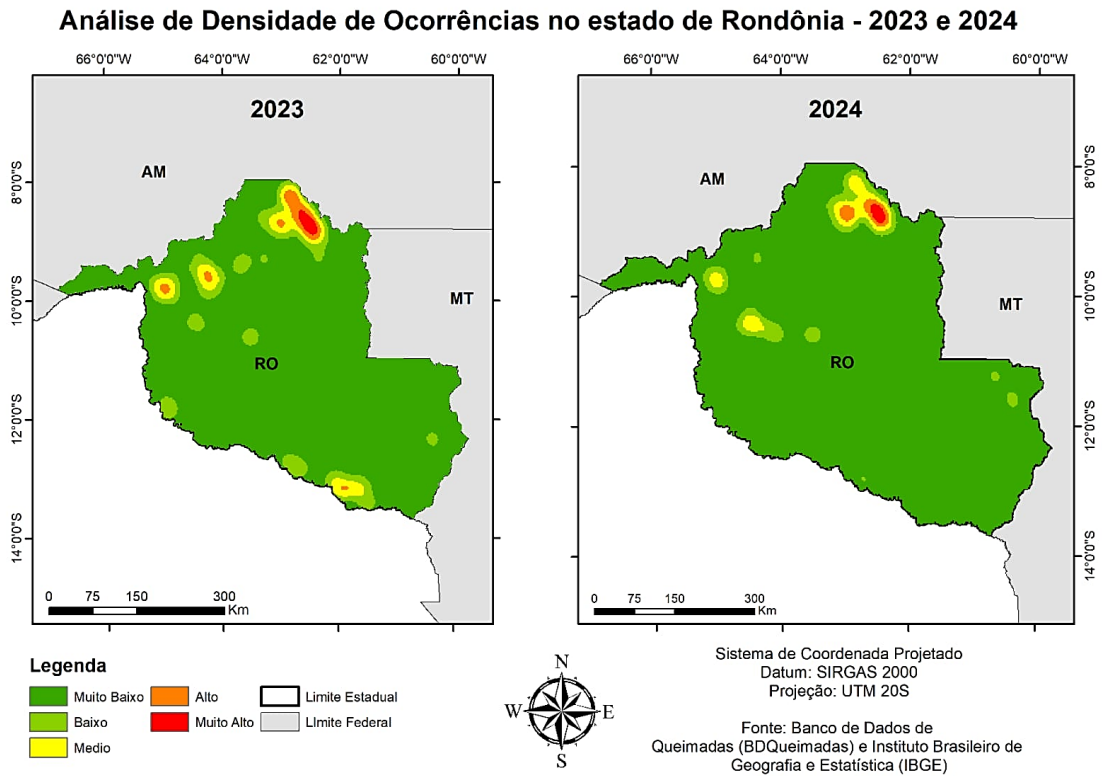
<sup>9</sup> Landsat 8 e Landsat 9 são satélites de observação da Terra operados pelos Estados Unidos, como parte do programa Landsat, uma das mais longas iniciativas de monitoramento ambiental por satélite do mundo. Eles são

demonstraram que as CNNs apresentam alta eficiência na classificação de áreas queimadas, evidenciando robustez e capacidade de generalização mesmo em contextos distintos dos dados utilizados para treinamento.

De acordo com Santana et al., (2024), uma análise da dinâmica do fogo na Amazônia entre 1985 e 2022 mostrou que aproximadamente 26,5% da região possui uma propensão moderada a muito alta a incêndios, influenciada tanto pelas atividades humanas quanto pelas condições climáticas. O estudo utilizou o método de entropia máxima para avaliar a probabilidade de incêndios, combinando preditores ambientais com registros de ocorrências passadas. As projeções indicam uma possível expansão das áreas suscetíveis ao fogo até 2040, especialmente sob cenários de aquecimento global.

Toledo et al., (2024) explicam que os incêndios florestais na Amazônia são intensificados por fatores climáticos, especialmente durante períodos de seca associados a eventos do El Niño. O estudo destaca o aumento expressivo das áreas queimadas no El Niño de 2015-2016, mostrando como as águas subterrâneas desempenham um papel fundamental na regulação das secas hidrológicas na região. A investigação utilizou indicadores de seca em diferentes profundidades do solo e analisou dados de ocorrência entre 2004 e 2016, revelando um forte brilho entre a disponibilidade de água subterrânea e os padrões de incêndios florestais.

Figura 2

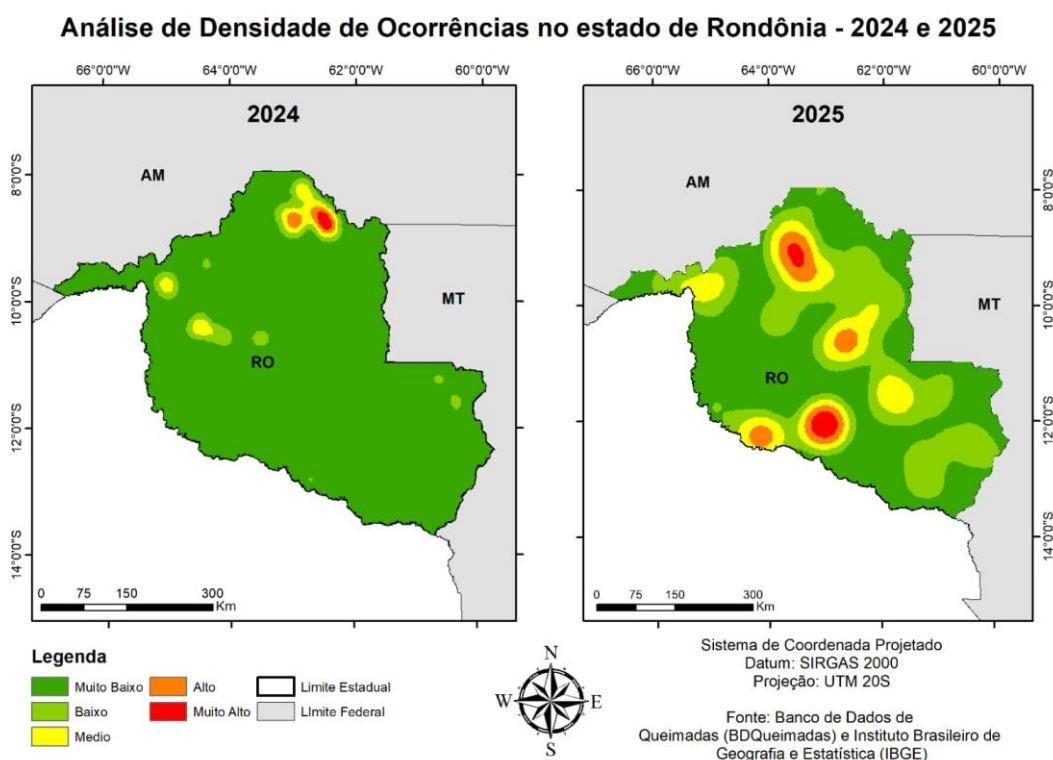


utilizados principalmente para monitorar mudanças na superfície terrestre, incluindo desmatamento, queimadas, uso do solo, recursos hídricos e mudanças climáticas.

A imagem apresenta uma análise de densidade de ocorrências de queimadas no estado de Rondônia nos anos de 2023 e 2024, com base em dados geoespaciais. Os mapas evidenciam uma concentração mais intensa de focos de calor na porção norte do estado, especialmente na divisa com o Amazonas (AM), com destaque para áreas classificadas como de densidade “muito alta” em 2024.

Jones et al., (2024) evidenciaram, no relatório *State<sup>10</sup> of Wildfires 2023–2024*, que a Amazônia Ocidental enfrentou incêndios severos impulsionados por secas extremas, com um aumento de até 50% nas áreas queimadas atribuível às mudanças climáticas. Os eventos apresentaram um horizonte de previsibilidade reduzido, dificultando a implementação de respostas antecipadas e eficazes. A análise indicou que a probabilidade de ocorrência de temporadas extremas de incêndios, como a de 2023, aumentou entre 20 e 28,5 vezes devido ao aquecimento global de origem antropogênica. Esses dados reforçam a urgência de ações estruturadas de adaptação climática e prevenção no contexto amazônico.

**Figura 3**



A análise comparativa dos mapas de densidade de ocorrências de queimadas em Rondônia nos anos de 2024 e 2025 revela mudanças significativas na distribuição espacial dos focos de calor. Em 2024, as áreas com maior concentração de queimadas localizam-se principalmente na porção norte do estado, próximas à divisa com o Amazonas (AM), onde os pontos vermelhos e laranja indicam alta e

<sup>10</sup> O relatório “Estado dos Incêndios Florestais 2023–2024” apresenta uma análise sistemática da temporada global de incêndios entre março de 2023 e fevereiro de 2024. Ele documenta eventos extremos em regiões como Canadá, Amazônia Ocidental e Grécia, investiga fatores climáticos por trás desses incêndios e quantifica sua intensidade e frequência.

muito alta densidade, sugerindo forte pressão sobre áreas de floresta e zonas rurais. Já em 2025, observa-se uma ampliação expressiva tanto na dispersão quanto na intensidade dos incêndios, com as áreas críticas estendendo-se para regiões centrais, sul e leste do estado. Essa expansão pode estar relacionada a fatores como o agravamento das condições climáticas, o avanço do desmatamento e o uso recorrente do fogo como prática de manejo agrícola, aumentando o risco de degradação ambiental em escala mais ampla.

Segundo Andrus e Waters (2024), o estudo analisou como os principais jornais dos Estados Unidos e do Brasil abordaram os incêndios na floresta amazônica em 2019, explorando as diferenças no enquadramento das notícias. Uma pesquisa utilizou a teoria do enquadramento para avaliar 250 notícias, destacando como as mensagens veiculadas pela mídia podem influenciar a percepção pública em diferentes culturas, tanto no que diz respeito à importância ambiental quanto às implicações econômicas dos incêndios.

Conforme o Sexto Relatório de Avaliação do Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC<sup>11</sup> (2023), as ações humanas estão causando um aquecimento global sem precedentes, com impactos desiguais entre as diferentes regiões do planeta. O relatório destaca que as emissões de gases de efeito estufa, resultantes de padrões de consumo e produção insustentáveis, têm contribuído para o aumento das temperaturas e para a intensificação de eventos climáticos extremos, afetando de forma desproporcional as comunidades mais vulneráveis.

"As mudanças climáticas causadas pelo homem já estão afetando muitos extremos climáticos em todas as regiões do mundo. Isso levou a impactos adversos generalizados na segurança alimentar e hídrica, na saúde humana e nas economias e na sociedade e perdas e danos relacionados à natureza e às pessoas. As comunidades vulneráveis que historicamente contribuíram menos para as mudanças climáticas atuais são desproporcionalmente afetadas" (IPCC, 2023, p. 6).

De acordo com Duane (2021), os eventos extremos de incêndios florestais ocorridos nos últimos anos têm desafiado o conhecimento estabelecido sobre a resposta dos regimes de incêndio às variações climáticas e sobre como as sociedades devem lidar com os impactos causados pelo fogo. Embora os incêndios sejam, por natureza, estocásticos e extremos, a intensidade, velocidade e extensão dos novos incêndios relatados recentemente são sem precedentes. Duane identifica características comuns nesses eventos emergentes, como a alta intensidade do fogo e a rápida propagação, e revisa os principais mecanismos que explicam sua ocorrência.

Conforme o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (2023) conclui que as atividades humanas são a causa principal do aquecimento global observado nas últimas décadas. As evidências científicas apontam para um aumento significativo da temperatura global, acompanhado de mudanças drásticas nos

---

<sup>11</sup> Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, é um órgão científico da Organização das Nações Unidas (ONU) criado em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

oceanos, geleiras e cobertura de gelo, atribuídas principalmente ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera.

Embora a literatura científica traga avanços significativos no entendimento das causas e consequências das queimadas na Amazônia, nota-se uma carência de políticas públicas que incorporem esse conhecimento técnico de forma eficaz. As evidências apontam para a complexidade dos fatores que impulsionam os incêndios, envolvendo desde mudanças climáticas até dinâmicas socioeconômicas locais. No entanto, as respostas governamentais ainda se concentram majoritariamente em ações reativas, como decretos emergenciais e proibições temporárias de queimadas, sem o devido investimento em ações estruturais e preventivas, como educação ambiental, reforma fundiária e fortalecimento da governança territorial.

Rorato et al., (2021) destacam que um dos pontos cruciais na análise das ameaças ambientais à Amazônia é a desigualdade dos impactos sociais e ambientais. As populações indígenas, ribeirinhas e comunidades tradicionais frequentemente sofrem os maiores prejuízos, especialmente em decorrência da degradação ambiental e da exposição prolongada à fumaça proveniente das queimadas, sem o devido suporte dos sistemas de saúde ou de proteção ambiental.

Essa realidade revela uma profunda assimetria de poder e de acesso a direitos, exigindo um olhar interseccional na formulação de políticas públicas. É fundamental garantir a participação efetiva dessas populações nos processos decisórios e reconhecer o valor de seus conhecimentos tradicionais como parte integrante das estratégias de adaptação e enfrentamento climático.

Rorato et al., (2021) demonstram ainda a importância crescente das tecnologias de sensoriamento remoto, aprendizado de máquina e modelagem espacial no monitoramento de incêndios florestais. Apesar do avanço técnico, há uma lacuna crítica entre a geração de dados e sua aplicação prática na gestão territorial e nas tomadas de decisão em tempo real. Isso evidencia a necessidade de integrar ciência e política de forma mais eficaz, criando canais permanentes de comunicação entre pesquisadores, gestores públicos e sociedade civil organizada.

Além disso, a predominância de medidas de curto prazo para conter incêndios evidencia uma lógica de enfrentamento emergencial que desconsidera a natureza cíclica e previsível das estações de seca. A Amazônia, por suas características climáticas e ecológicas, requer planejamento contínuo e multissetorial. Assim, é fundamental promover ações articuladas entre os setores ambiental, agrícola, de saúde e de infraestrutura, considerando não apenas o combate direto ao fogo, mas também o ordenamento territorial, o controle do uso do solo e a valorização de práticas produtivas sustentáveis.

MapBiomass<sup>12</sup> Brasil (2025) destaca que as consequências ambientais das queimadas na Amazônia são múltiplas e profundamente impactantes. A supressão da cobertura vegetal compromete a

---

<sup>12</sup> O MapBiomass surgiu oficialmente em julho de 2015, e é organizado de maneira colaborativa: ONGs, universidades, laboratórios e startups de tecnologia formam a rede. Realizamos o mapeamento anual da cobertura e uso da terra, além do monitoramento mensal da superfície de água e das cicatrizes de fogo com dados desde 1985. Relatórios também são validados e elaborados para cada evento de desmatamento detectado no Brasil desde janeiro de 2019, por meio do MapBiomass Alerta.

capacidade da floresta de atuar como sumidouro de carbono, contribuindo para o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Além disso, o fogo degrada o solo, reduz a biodiversidade e altera o ciclo hidrológico regional, afetando a formação de nuvens e os padrões de precipitação — o que pode instaurar um ciclo retroalimentado de secas e queimadas.

Ribeiro et al., (2024) observam que as percepções sociais sobre as queimadas variam significativamente de acordo com os grupos sociais e suas relações diretas com o território. Populações indígenas, ribeirinhas e comunidades tradicionais, que dependem dos recursos naturais para sua sobrevivência física e cultural, percebem os incêndios como ameaças diretas à saúde, à segurança alimentar e ao modo de vida. Essas comunidades denunciam, de forma recorrente, a ausência de políticas públicas eficazes e a baixa inclusão social nos processos de gestão ambiental.

Duarte, Higuchi e Pinto Fraxe (2023) apontam que, em contrapartida, setores vinculados ao agronegócio e ao desenvolvimento econômico tendem a minimizar os impactos socioambientais das queimadas, legitimando o uso do fogo como prática de manejo e instrumento de expansão territorial. Essa divergência de percepções representa um obstáculo à construção de consensos e dificulta a formulação de políticas públicas integradas voltadas ao controle e à prevenção dos incêndios.

MapBiomias Brasil (2025) relata avanços no monitoramento das queimadas por meio de tecnologias de sensoriamento remoto e plataformas como o Monitor do Fogo, que possibilitam o acompanhamento quase em tempo real das áreas afetadas. Em 2024, a Amazônia registrou a maior área queimada dos últimos seis anos, totalizando 17,9 milhões de hectares — o equivalente a 58% da área queimada em todo o território nacional. Esses dados reforçam a urgência de estratégias territorialmente ajustadas e sustentadas por monitoramento contínuo, para subsidiar decisões políticas efetivas.

Duarte, Higuchi e Pinto Fraxe (2023) também enfatizam que a incorporação das percepções sociais é um componente essencial para a efetividade das políticas ambientais. A valorização dos saberes tradicionais, o fortalecimento da educação ambiental e a inclusão ativa das comunidades locais nos processos decisórios são estratégias fundamentais para a prevenção de incêndios e o uso sustentável do território.

A articulação entre projeções climáticas, sistemas de monitoramento ambiental e o entendimento das percepções sociais constitui, conforme os autores analisados, uma base sólida para enfrentar os incêndios florestais na Amazônia. Mais do que respostas emergenciais, as políticas públicas devem adotar uma abordagem integrada, que contemple simultaneamente os aspectos ecológicos, sociais e culturais do território. Apenas com essa visão ampla e intersetorial será possível desenvolver soluções efetivas e duradouras, promovendo a justiça ambiental, a preservação dos ecossistemas e a proteção da saúde coletiva. Por fim, a análise crítica dos estudos evidenciou a urgência de se abandonar modelos desenvolvimentistas baseados na expansão da fronteira agropecuária à custa da floresta. O combate às queimadas não pode ser dissociado do enfrentamento das desigualdades regionais e da redefinição do modelo de desenvolvimento para a Amazônia. Investir em bioeconomia, conservação florestal e fortalecimento das cadeias produtivas sustentáveis é um caminho viável e necessário para

garantir a integridade do bioma, o bem-estar das populações locais e o cumprimento dos compromissos ambientais globais assumidos pelo Brasil.

## **CAPÍTULO II. POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O COMBATE DAS QUEIMADAS E DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA LEGAL: AVANÇOS, LIMITAÇÕES E IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE**

A preservação da Amazônia e o combate ao desmatamento e às queimadas exigem uma abordagem integrada que articule monitoramento ambiental, regulação, fiscalização, financiamento e participação social. No contexto desta dissertação, a análise das políticas públicas não constitui um fim em si mesmo, mas serve como pano de fundo para compreender em que medida as estratégias governamentais existentes têm conseguido reduzir a exposição da população ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas e, conseqüentemente, proteger grupos vulneráveis como crianças e idosos dos agravos respiratórios associados à poluição por biomassa. A ausência ou ineficácia dessas políticas em determinados períodos configura, portanto, um determinante indireto da carga hospitalar por agravos respiratórios em municípios amazônicos como Porto Velho.

### **2.1 Marco normativo federal: legislação ambiental e padrões de qualidade do ar**

O arcabouço normativo federal que rege o combate ao desmatamento e às queimadas na Amazônia Legal articula legislação ambiental, regulamentação da qualidade do ar e mecanismos de planejamento interinstitucional. O Código Florestal Brasileiro, instituído pela Lei nº 12.651/2012, estabelece as bases legais para a proteção da vegetação nativa, incluindo a definição de Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal, instrumentos fundamentais para conter o avanço do desmatamento que cria as condições para a intensificação das queimadas.

No âmbito da qualidade do ar, a Resolução CONAMA nº 506, de 4 de julho de 2024, atualizou os padrões nacionais de qualidade do ar, aproximando os limites estabelecidos pelo Brasil das diretrizes da Organização Mundial da Saúde. O padrão anual para PM<sub>2,5</sub> foi reduzido de 10 µg/m<sup>3</sup> para 8 µg/m<sup>3</sup>, e o padrão de 24 horas foi fixado em 25 µg/m<sup>3</sup>, valores que, no entanto, ainda permanecem acima da recomendação de 5 µg/m<sup>3</sup> e 15 µg/m<sup>3</sup> da OMS, respectivamente (WHO, 2021; BRASIL, 2024). Em Porto Velho, as concentrações mensais de PM<sub>2,5</sub> registradas nos meses de agosto e setembro nos anos de 2020 a 2024 superaram repetidamente tanto os padrões nacionais quanto as diretrizes internacionais, evidenciando que o marco normativo existente, embora necessário, é insuficiente para proteger a saúde da população em contextos de queimadas intensas sem o correspondente esforço de fiscalização e redução na fonte.

### **2.2 O Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm)**

O PPCDAm, lançado em 2004 e estruturado em cinco fases, representa o principal instrumento de política pública federal voltado à redução do desmatamento na Amazônia Legal. Criado em 2004, o PPCDAm foi o principal responsável pela queda de 83% do desmatamento até 2012, segundo dados do

INPE. Esse resultado histórico foi obtido por meio da articulação de três eixos estratégicos: ordenamento territorial, controle ambiental e fomento a atividades produtivas sustentáveis, que orientaram tanto as ações federais quanto a elaboração dos planos estaduais de combate ao desmatamento (FUNDO AMAZÔNIA, 2023).

A quinta fase do PPCDAm, lançada em 5 de junho de 2023, é composta por 176 linhas de ação e busca atingir ao menos 36 resultados, com ênfase no estímulo ao manejo florestal sustentável, no fortalecimento da bioeconomia e na melhoria do monitoramento do desmatamento. Em 2023, com a retomada do PPCDAm, houve redução de 22% da taxa de desmatamento em relação a 2022, e os dados de 2024 indicam redução de 45,7% em relação ao mesmo ano de referência, configurando a menor taxa dos últimos 12 anos. No estado de Rondônia, os resultados foram particularmente expressivos: entre os estados da Amazônia Legal, Rondônia registrou a maior redução de desmatamento no período 2023-2024, com queda de 62,51%. Esses dados indicam que a retomada do PPCDAm produziu resultados concretos em Rondônia, embora a relação entre redução do desmatamento e melhora da qualidade do ar não seja imediata, dado que as queimadas em áreas já desmatadas e nos estados vizinhos continuam sendo fontes relevantes de PM<sub>2,5</sub> para Porto Velho.

### **2.3 Instrumentos de financiamento e incentivos à conservação**

O Fundo Amazônia, gerido pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), constitui o principal mecanismo de financiamento de ações de prevenção ao desmatamento e de promoção do desenvolvimento sustentável na Amazônia. Criado em 2008 e reativado em 2023 após período de paralisia, o Fundo captou recursos internacionais oriundos principalmente da Noruega e da Alemanha para financiar projetos de monitoramento, controle do desmatamento, manejo florestal e ordenamento territorial (FUNDO AMAZÔNIA, 2023). Soma-se a isso a Estratégia Nacional para Redução das Emissões Provenientes do Desmatamento e da Degradação Florestal (ENREDD+), instituída pela Portaria MMA nº 370/2015, que permite ao Brasil acessar incentivos financeiros do mecanismo REDD+ da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), integrando políticas de clima, florestas e biodiversidade em diferentes níveis de governo.

No âmbito nacional, Marcovitch e Pinsky (2019) analisam as metas assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris, incluindo a redução do desmatamento ilegal a zero até 2030 e a restauração de 12 milhões de hectares de floresta, destacando a importância do Fundo Amazônia e do fortalecimento das capacidades científicas e institucionais para o monitoramento e a governança florestal. Costa (2024) amplia essa perspectiva ao discutir a centralidade da Amazônia nos debates internacionais sobre sustentabilidade, defendendo a construção de um pacto pela Amazônia com protagonismo dos povos amazônidas e orientado para uma civilização florestal tropical sustentável, agenda que se tornará ainda mais relevante no contexto da COP 30, prevista para Belém em 2025.

## **2.4 Políticas regionais em Rondônia: da fiscalização à educação ambiental**

No plano regional, o estado de Rondônia desenvolveu nas últimas décadas um conjunto de instrumentos próprios de gestão ambiental, coordenados principalmente pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental (SEDAM). O estado instituiu o Setembro Cinza por meio da Lei Estadual nº 5.281, de 12 de janeiro de 2022, que dispõe sobre a conscientização, prevenção e combate às queimadas e incêndios florestais em Rondônia. Essa iniciativa legislativa estadual é relevante para o contexto desta dissertação por representar o reconhecimento formal, pelo poder público rondoniense, de que o mês de setembro concentra o pico de exposição da população ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas, período que coincide exatamente com os maiores valores de concentração documentados na série analisada entre 2020 e 2024.

O Plano de Prevenção e Combate às Queimadas de Rondônia foi elaborado em formato multinível, com parcerias entre a SEDAM, o Batalhão de Polícia Ambiental, a Defesa Civil, o Centro Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais (Prevfogo) e o Corpo de Bombeiros Militar, com prioridade aos municípios de maior incidência de focos de calor, entre os quais Porto Velho, Nova Mamoré, Candeias do Jamari, Machadinho do Oeste, Buritis e Cujubim, que correspondem a 69% da área desmatada no estado. A inclusão de Porto Velho como município prioritário confirma a relevância do contexto local estudado nesta dissertação e evidencia que a exposição ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas na capital rondoniense é reconhecida pelas próprias autoridades estaduais como problema de saúde pública que demanda ação governamental específica.

O Plano de Operações para a Temporada de Incêndios Florestais (POTIF), coordenado pela SEDAM e pelo Corpo de Bombeiros Militar de Rondônia, prevê a criação de um Centro Integrado de Multiagências de Coordenação Operacional, essencial para coordenar respostas às emergências durante a temporada de queimadas. Esse mecanismo de coordenação interinstitucional representa avanço relevante no plano operacional, mas ainda não está articulado formalmente com os sistemas de vigilância em saúde ambiental do município de Porto Velho, lacuna que os achados desta dissertação podem contribuir para preencher ao fornecer evidências locais sobre os impactos das queimadas sobre as internações hospitalares em grupos vulneráveis.

## **2.5 Limitações das políticas existentes e implicações para a saúde da população**

Apesar dos avanços normativos e institucionais descritos, as políticas públicas de combate às queimadas na Amazônia Legal apresentam limitações relevantes do ponto de vista da proteção à saúde da população. Berenguer et al. (2024) argumentam que as políticas emergenciais, como as proibições temporárias de queimadas decretadas durante picos de incêndio, não são suficientes para resolver as crises de incêndio na Amazônia, pois não abordam os determinantes estruturais do problema, como a pressão do desmatamento e a fragilidade da fiscalização em áreas remotas. Essa crítica é coerente com

os dados desta dissertação: mesmo nos anos em que medidas emergenciais foram adotadas em Rondônia, as concentrações de PM<sub>2,5</sub> em Porto Velho permaneceram em níveis que ultrapassam os padrões da OMS durante os meses de agosto e setembro.

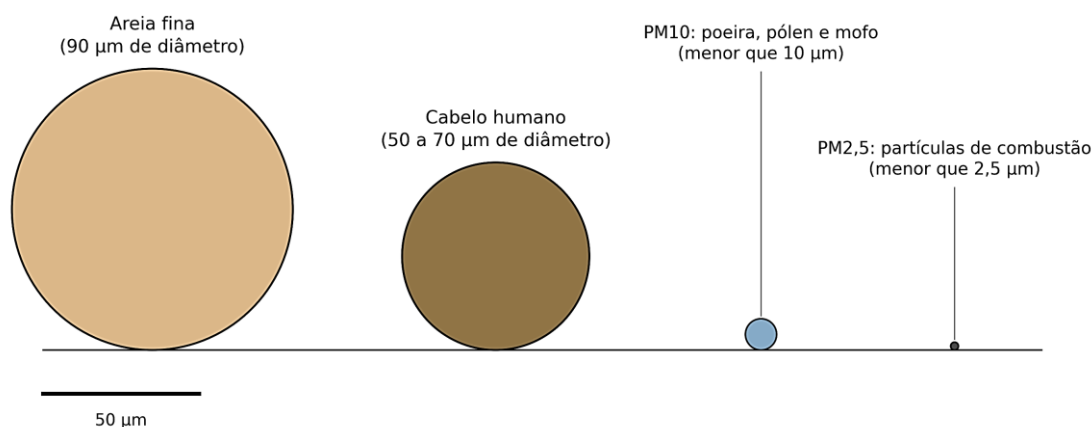
Uma limitação adicional das políticas existentes é a ausência de integração formal entre as ações de controle ambiental e os sistemas de vigilância em saúde. Os planos estaduais e municipais de combate às queimadas concentram-se predominantemente em ações de fiscalização, monitoramento de focos e educação ambiental, sem articulação explícita com os serviços de saúde para preparação da rede hospitalar durante o período seco ou com estratégias de proteção de grupos vulneráveis como crianças e idosos. Os resultados desta dissertação, ao documentar a maior carga hospitalar por pneumonia em idosos no período chuvoso e a ausência de sazonalidade estatisticamente definida para os demais desfechos avaliados, reforçam a necessidade de uma abordagem de vigilância em saúde ambiental que vá além do período seco e contemple estratégias diferenciadas para cada contexto climático, integrando as dimensões ambiental, epidemiológica e assistencial em uma política de saúde ambiental abrangente e territorialmente sensível para a Amazônia Ocidental.

## CAPÍTULO III. EFEITOS DO PM<sub>2,5</sub> NO SISTEMA RESPIRATÓRIO: INFECCÕES E DOENÇAS PULMONARES

### 3.1 Caracterização do Poluente e Vias de Deposição Pulmonar

O material particulado fino, cujas partículas apresentam diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 micrômetros (PM<sub>2,5</sub>), constitui uma das frações mais toxicologicamente relevantes da poluição atmosférica, dada sua capacidade de penetrar profundamente no trato respiratório inferior, depositando-se nos bronquíolos terminais e nos alvéolos pulmonares (MA et al., 2024). Ao contrário de partículas maiores, que são removidas pelos mecanismos de depuração mucociliar das vias aéreas superiores, o PM<sub>2,5</sub> escapa desses mecanismos defensivos e atinge regiões onde a superfície de troca gasosa é máxima e onde os macrófagos alveolares, células sentinelas da imunidade inata pulmonar, representam a primeira linha de defesa do hospedeiro contra agentes inalados (MA et al., 2024).

**Figura 2** – Comparação de tamanho entre o material particulado (PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>) e partículas de referência (cabelo humano e areia fina).



Fonte: elaborada pela autora (2026).

Em termos composicionais, as partículas ultrafinas oriundas da queima de biomassa, predominante no contexto amazônico, carregam hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), carbono negro, metais de transição, compostos orgânicos voláteis e endotoxinas bacterianas adsorvidas à sua superfície (PARDO et al., 2024). Essa mistura complexa de constituintes biologicamente ativos amplifica as respostas inflamatórias e oxidativas desencadeadas no epitélio respiratório em magnitude superior à observada com PM<sub>2,5</sub> de origem veicular ou industrial, o que torna o contexto regional da Amazônia ocidental, marcado por queimadas sazonais recorrentes e elevada densidade de focos de calor, um cenário epidemiologicamente crítico para desfechos respiratórios agudos e crônicos (OLIVEIRA et al., 2012; COKER et al., 2022).

### 3.2 Mecanismos Fisiopatológicos da Injúria Respiratória Induzida pelo PM<sub>2,5</sub>

### 3.2.1 Estresse Oxidativo e Inflamação

A deposição alveolar do PM<sub>2,5</sub> desencadeia uma cascata fisiopatológica centrada na geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), fenômeno que constitui o eixo patogênico primário pelo qual o poluente compromete a integridade estrutural e funcional do parênquima pulmonar (PARDO et al., 2024). As EROs são produzidas tanto diretamente, pelos componentes redox-ativos das partículas, quanto indiretamente, pela ativação de células inflamatórias residentes e recrutadas ao parênquima. Macrófagos alveolares estimulados pelo PM<sub>2,5</sub> liberam citocinas pró-inflamatórias (TNF-alfa, IL-1 beta e IL-8), que perpetuam a resposta inflamatória e recrutam neutrófilos para o sítio de deposição (MA et al., 2024).

O estresse oxidativo resultante peroxida lipídios de membrana, oxida proteínas estruturais e catalisa danos ao DNA de células epiteliais, podendo culminar em piroptose, uma forma de morte celular inflamatória que amplifica a cascata imunológica (PARDO et al., 2024). Paralelamente, a ativação do fator nuclear eritroide 2 relacionado ao fator 2 (Nrf2), principal regulador transcricional da resposta antioxidante celular, induz a expressão de enzimas protetoras como a heme oxigenase 1 (HO-1), a superóxido dismutase (SOD1/2), a glutatona peroxidase (Gpx1) e a NAD(P)H quinona desidrogenase 1 (NQO1). Entretanto, a exposição crônica ou aguda de alta intensidade supera essa capacidade adaptativa e perpetua o desequilíbrio redox, criando condições favoráveis ao desenvolvimento e à exacerbação de doenças respiratórias (PARDO et al., 2024; MA et al., 2024).

### 3.2.2 Comprometimento da Barreira Epitelial e Disfunção Imunológica

Além dos efeitos oxidativos diretos, o PM<sub>2,5</sub> compromete a integridade das junções epiteliais da via aérea, aumentando a permeabilidade transepitelial e facilitando a translocação de microrganismos patogênicos para o interstício pulmonar (MA et al., 2024). Do ponto de vista da imunidade inata, a exposição ao PM<sub>2,5</sub> reduz a capacidade fagocítica e a atividade microbicida dos macrófagos alveolares, prejudicando os mecanismos de depuração de patógenos inalados. Estudos demonstram que a inibição da via mTOR induzida por altas concentrações de PM<sub>2,5</sub> suprime funções essenciais dos macrófagos alveolares, incluindo a fagocitose, o processamento antigênico e a produção de mediadores antimicrobianos, tornando o hospedeiro mais susceptível a infecções respiratórias (MA et al., 2024).

O comprometimento da imunidade adaptativa também foi documentado: o PM<sub>2,5</sub> modifica o perfil de ativação de linfócitos T, favorecendo respostas do tipo Th2 sobre Th1, o que, no contexto de doenças alérgicas como a asma, amplifica a sensibilização a aeroalérgenos e potencializa a inflamação eosinofílica da via aérea. A ativação do receptor de hidrocarboneto de arila (AhR) por PAHs presentes no PM<sub>2,5</sub> de queimadas regula a expressão de genes de fase I do metabolismo xenobiótico e modula diretamente a polarização de linfócitos Th17, frequentemente associados a formas mais graves de asma de difícil controle (PARDO et al., 2024; MA et al., 2024).

### 3.2.3 Genotoxicidade e Remodelamento Estrutural Pulmonar

A longo prazo, a exposição repetida ao PM<sub>2,5</sub> induz remodelamento fibrótico da via aérea por meio da ativação do fator de crescimento transformador beta 1 (TGF-beta1), que estimula a produção de fibronectina, colágeno e metaloproteinases de matriz (MMPs). Esse remodelamento estrutural produz estreitamento luminal irreversível da via aérea, perda de elasticidade pulmonar e declínio progressivo da função ventilatória, mecanismos centrais na fisiopatologia da Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC) induzida por poluição atmosférica (ZHAO et al., 2019). Em análise de randomização mendeliana, Jiang et al. (2024) demonstraram relação causal estatisticamente significativa entre exposição ao PM<sub>2,5</sub> e tanto asma quanto DPOC, sustentada pelo limiar de significância  $p < 5 \times 10^{-8}$  em dados de estudos de associação genômica ampla (GWAS), confirmando a plausibilidade biológica dessa associação em delineamento capaz de controlar a confusão residual (JIANG et al., 2024).

### 3.3 PM<sub>2,5</sub> e Susceptibilidade a Infecções Respiratórias

A relação entre poluição por PM<sub>2,5</sub> e infecções respiratórias envolve múltiplos mecanismos que se sobrepõem e se potencializam mutuamente. Ma et al. (2024), em revisão publicada no *European Respiratory Review*, sintetizaram evidências de que o PM<sub>2,5</sub> manipula a resposta imunológica respiratória de modo a favorecer a patogenicidade microbiana, por meio de quatro mecanismos principais: redução da depuração mucociliar, comprometimento da imunidade inata de macrófagos, perturbação da microecologia respiratória e regulação negativa da resposta antiviral mediada por interferon (MA et al., 2024).

No que tange às infecções bacterianas, a exposição ao PM<sub>2,5</sub> favorece a virulência de patógenos como *Streptococcus pneumoniae*, *Haemophilus influenzae* e *Pseudomonas aeruginosa*, ao comprometer o clearance fagocítico alveolar. No contexto das infecções virais, estudos demonstraram que o PM<sub>2,5</sub> potencializa a infecção pelo vírus influenza H3N2 e que a exposição particulada aumenta a expressão de ACE2 e TMPRSS2, receptores de entrada do SARS-CoV-2, na mucosa do trato respiratório (MA et al., 2024). Esses achados conferem relevância epidemiológica adicional à exposição ao PM<sub>2,5</sub> em contextos de co-ocorrência de epidemias respiratórias e períodos de alta queimada, situação recorrente na Amazônia brasileira.

No âmbito da pneumonia em crianças, evidências ecológicas provenientes da Amazônia Legal corroboram essa relação. Estudo conduzido em município do Mato Grosso identificou correlação positiva entre concentrações de PM<sub>2,5</sub> e internações pediátricas por pneumonia, com concentrações médias de 13,11 µg/m<sup>3</sup> nos dias com duas ou mais internações, em contraste com 6,6 µg/m<sup>3</sup> nos dias sem internações, com pico de hospitalizações nos meses de transição entre a estação chuvosa e a seca (OLIVEIRA et al., 2012). Em Cuiabá-MT, Machin et al. (2019) observaram risco relativo de hospitalização 31,8% superior para cada aumento de 3,5 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2,5</sub>, com defasagens de três a

quatro dias, sugerindo que o efeito máximo sobre a susceptibilidade a infecções pulmonares em idosos se manifesta de forma retardada em relação ao pico de exposição.

### 3.4 PM<sub>2,5</sub> e Exacerbação da Asma

A asma constitui a condição respiratória crônica mais fortemente associada à exposição ao PM<sub>2,5</sub> tanto em estudos de série temporal quanto em análises de causalidade. Por meio de randomização mendeliana bidirecional com dados de GWAS, Jiang et al. (2024) confirmaram a causalidade entre PM<sub>2,5</sub> e asma sob o limiar  $p < 5 \times 10^{-8}$ , resistente ao ajuste para tabagismo e índice de massa corporal na análise multivariável, conferindo robustez metodológica à hipótese causal (JIANG et al., 2024).

Os mecanismos pelos quais o PM<sub>2,5</sub> exacerba a asma são multifacetados. A estimulação dos receptores *Toll*-like TLR2 e TLR4 por componentes lipopolissacarídeos do PM<sub>2,5</sub> de queimadas ativa a via de sinalização MyD88/NF- $\kappa$ B, com consequente produção de IL-6, IL-8 e TNF-alfa, desencadeando broncoespasmo e recrutamento de eosinófilos para a mucosa brônquica. Nos pulmões de indivíduos asmáticos, a inflamação preexistente das vias aéreas amplifica essa resposta, gerando uma potencialização do efeito que explica a maior vulnerabilidade clínica observada nessa população (MA et al., 2024). A via Nrf2/AhR, ativada por PAHs presentes no PM<sub>2,5</sub> de biomassa, modula ainda a produção de imunoglobulina E (IgE) e a polarização Th2, sustentando a inflamação alérgica de modo crônico.

No contexto amazônico, a relevância clínica é evidenciada pelos dados epidemiológicos produzidos na região. Em Porto Velho, Rondônia, estimativas derivadas de séries temporais diárias (2016 a 2025) indicam que cada incremento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>2,5</sub> associou-se a aumento de 5,6% nas hospitalizações por asma em crianças de até 14 anos (IRR = 1,056; IC 95%: 1,019-1,094), com defasagem acumulada de 0 a 7 dias. Esse efeito mostrou-se consistente ao longo de todo o ano, sem modificação estatisticamente significativa por sazonalidade ( $p$  de interação = 0,988) ou por carga de queimadas ( $p$  de interação = 0,488), reforçando a vulnerabilidade respiratória pediátrica ao PM<sub>2,5</sub> independentemente do período de maior concentração de focos, em magnitude consistente com a relatada por Coker et al. (2022) em Rio Branco.

### 3.5 PM<sub>2,5</sub> e Progressão da Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica

A DPOC, caracterizada pela limitação progressiva e irreversível ao fluxo aéreo, compartilha com a asma o PM<sub>2,5</sub> como importante fator de risco ambiental, embora os mecanismos predominantes sejam distintos. Enquanto na asma prevalece a inflamação eosinofílica IgE-mediada, na DPOC o PM<sub>2,5</sub> atua primariamente por meio da inflamação neutrofílica crônica, do estresse oxidativo persistente e do remodelamento fibrótico irreversível das pequenas vias aéreas, com destruição progressiva da arquitetura alveolar que caracteriza o enfisema (ZHAO et al., 2019).

O PM<sub>2,5</sub> induz a expressão de IL-6 e IL-8 em células epiteliais brônquicas em concentrações tão baixas quanto 25 µg/cm<sup>2</sup>, além de elevar os níveis de TGF-beta1, fibronectina e colágeno, indicadores de remodelamento fibrótico. As MMPs, secretadas em excesso em resposta ao PM<sub>2,5</sub>, degradam componentes da matriz extracelular e contribuem para a destruição alveolar observada no enfisema (ZHAO et al., 2019). Do ponto de vista da função pulmonar, estudo prospectivo de coorte realizado em Taiwan demonstrou que o aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2,5</sub> associou-se a declínio clinicamente significativo do VEF1 e do índice de Tiffeneau, com risco aumentado de DPOC incidente durante seguimento médio de cinco anos, configurando evidência prospectiva de causalidade (GUO et al., 2018; JIANG et al., 2024).

Estudos de randomização mendeliana reforçam essa relação. Jiang et al. (2024) demonstraram que a associação PM<sub>2,5</sub>-DPOC persistiu na análise multivariável, mesmo após controle estatístico para tabagismo e infecções bacterianas, sugerindo um efeito direto do poluente sobre a patogênese da doença, independente de fatores intermediários clássicos. No contexto amazônico, a coexistência de exposição intensa ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas com limitado acesso aos serviços especializados de saúde representa um cenário de particular gravidade, pois o diagnóstico tardio da DPOC e a ausência de tratamento farmacológico adequado permitem que a doença progrida para estágios avançados antes que intervenções modificadoras sejam implementadas (JIANG et al., 2024).

### 3.6 Implicações Clínicas e Epidemiológicas no Contexto Amazônico

A Amazônia brasileira concentra um conjunto de determinantes que amplificam o impacto do PM<sub>2,5</sub> sobre os desfechos respiratórios: intensa atividade de queimadas durante a estação seca (julho-outubro), com concentrações de PM<sub>2,5</sub> que frequentemente ultrapassam 350-450 µg/m<sup>3</sup> em municípios do chamado "arco do desmatamento"; elevada prevalência de asma e infecções respiratórias pediátricas; limitada cobertura diagnóstica para DPOC; e populações vulneráveis incluindo crianças, idosos e comunidades ribeirinhas com reduzido acesso a serviços de saúde (OLIVEIRA et al., 2012). Em Rondônia, a sobreposição temporal entre os picos de queimadas e os meses de maior frequência de internações pediátricas por asma e pneumonia constitui evidência epidemiológica convergente que sustenta a hipótese de causalidade entre o PM<sub>2,5</sub> de biomassa e os desfechos respiratórios na região.

Do ponto de vista do manejo clínico, a gravidade dos efeitos do PM<sub>2,5</sub> sobre o sistema respiratório exige que os profissionais de saúde atuantes na Amazônia reconheçam a poluição atmosférica como determinante de saúde relevante e adotem estratégias preventivas e assistenciais adaptadas ao contexto regional. A vigilância ambiental integrada com os sistemas de informação em saúde, o fortalecimento da atenção primária para detecção precoce de agravamentos respiratórios durante períodos de alta queimada e a implementação de protocolos de contingência em serviços hospitalários durante eventos extremos de poluição constituem medidas prioritárias para a redução da morbimortalidade respiratória associada ao PM<sub>2,5</sub> na região (OLIVEIRA et al., 2012; MACHIN et al.,

2019).

### **3.7 Síntese do Capítulo**

As evidências apresentadas neste capítulo sustentam que o PM<sub>2,5</sub> exerce efeitos causal e biologicamente plausíveis sobre o sistema respiratório, operando por meio de mecanismos complementares que incluem estresse oxidativo mediado por EROs, disfunção imunológica inata e adaptativa, comprometimento da barreira epitelial, perturbação da microecologia pulmonar e remodelamento fibrótico das vias aéreas. Esses mecanismos traduzem-se clinicamente em maior susceptibilidade a infecções respiratórias bacterianas e virais, exacerbação da asma brônquica e progressão da DPOC, com impacto mensurável nas taxas de hospitalização e mortalidade, particularmente em crianças e idosos. No contexto amazônico, onde a queima de biomassa é a principal fonte de PM<sub>2,5</sub> e onde as vulnerabilidades socioepidemiológicas das populações potencializam o risco, o enfrentamento da poluição atmosférica constitui uma questão de saúde pública urgente, que demanda tanto ações de vigilância e intervenção clínica quanto políticas ambientais de longo prazo orientadas ao controle do desmatamento e das queimadas.

## **CAPÍTULO IV. VULNERABILIDADE DE CRIANÇAS E IDOSOS À POLUIÇÃO ATMOSFÉRICAS E ÀS INFECÇÕES RESPIRATÓRIAS SAZONAIS**

### **4.1 Bases da vulnerabilidade em crianças**

Crianças constituem um dos grupos populacionais mais vulneráveis aos efeitos adversos da poluição atmosférica, em razão de características anatômicas, fisiológicas e imunológicas que ampliam sua susceptibilidade à exposição ao material particulado fino. O sistema respiratório infantil encontra-se em processo de desenvolvimento até aproximadamente os oito anos de vida, período durante o qual a imaturidade das vias aéreas, a menor capacidade de depuração mucociliar e a incompletude da maturação imunológica tornam o organismo menos eficiente na eliminação de partículas inaladas e na contenção de respostas inflamatórias (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021).

Aproximadamente 80% dos alvéolos pulmonares formam-se após o nascimento, o que significa que a exposição a poluentes durante a infância pode comprometer diretamente o desenvolvimento estrutural do parênquima pulmonar, com consequências que se estendem à vida adulta (ARBEX et al., 2012).

GUO, Y. et al. A causal modelling framework for short-term effects of PM<sub>2.5</sub> on hospitalisations: a nationwide time series study in Brazil. *Environment International*, v. 171, p. 107688, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107688>

A maior frequência respiratória proporcional ao peso corporal em crianças implica maior volume de ar inalado por unidade de massa corporal em comparação aos adultos, resultando em dose efetiva de poluentes significativamente superior para o mesmo nível de concentração ambiental (REQUIA et al., 2021). Soma-se a isso o fato de que crianças tendem a permanecer mais tempo em ambientes externos, especialmente em áreas de recreação próximas a fontes de poluição, ampliando a exposição cumulativa ao PM<sub>2,5</sub>. Em contextos amazônicos, onde as concentrações de PM<sub>2,5</sub> podem ultrapassar 100 µg/m<sup>3</sup> durante o período seco, essas características tornam a população infantil particularmente exposta a riscos de agravamento respiratório, desencadeamento de episódios de asma e aumento da susceptibilidade a infecções do trato respiratório inferior (GONÇALVES; CASTRO; HACON, 2012).

Do ponto de vista imunológico, a imaturidade do sistema imune inato e adaptativo em crianças reduz a capacidade de resposta adequada a agentes infecciosos e à inflamação induzida por partículas, favorecendo a progressão de infecções respiratórias virais para quadros mais graves, com maior probabilidade de evolução para pneumonia e bronquiolite que demandem hospitalização (ZHANG et al., 2025). Estudos conduzidos em regiões amazônicas brasileiras identificaram que a exposição ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas em crianças está associada a danos ao DNA celular, aumento de espécies reativas de oxigênio e ativação de mecanismos inflamatórios no tecido pulmonar, com potencial de

comprometimento da função respiratória em longo prazo (OLIVEIRA ALVES et al., 2017).

#### **4.2 Bases da vulnerabilidade em idosos**

Idosos apresentam perfil de vulnerabilidade distinto do das crianças, caracterizado pelo acúmulo de comorbidades, declínio da reserva fisiológica e redução da eficiência dos mecanismos de defesa imunológica. O envelhecimento associa-se a fenômeno conhecido como imunossenescência, processo de declínio progressivo da competência imune que compromete tanto a resposta inata quanto a adaptativa, reduzindo a capacidade do organismo de combater agentes infecciosos e de regular respostas inflamatórias exacerbadas (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021). Essa condição torna os idosos simultaneamente mais susceptíveis a infecções respiratórias e menos capazes de contê-las antes que evoluam para quadros graves que demandem hospitalização.

A presença de comorbidades cardiovasculares, diabetes, doença pulmonar obstrutiva crônica e insuficiência renal, frequentes nessa faixa etária, amplia o risco de descompensação clínica diante de qualquer agressão adicional ao sistema respiratório ou cardiovascular, seja ela de origem ambiental ou infecciosa. Em contextos de exposição ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas, idosos com doenças respiratórias preexistentes apresentam risco substancialmente maior de internação hospitalar, conforme documentado em estudos de série temporal conduzidos na Amazônia brasileira (OLIVEIRA et al., 2019; NUNES; IGNOTTI; HACON, 2013). O PM<sub>2,5</sub> penetra profundamente no trato respiratório inferior e, em idosos com reserva pulmonar reduzida, pode desencadear processos inflamatórios sistêmicos que precipitam agravamento de condições preexistentes, incluindo eventos cardiovasculares agudos (BELL et al., 2012).

No contexto amazônico, a vulnerabilidade dos idosos não se restringe ao período seco. Durante o período chuvoso, a maior circulação de vírus respiratórios sazonais, em especial influenza e vírus sincicial respiratório, representa ameaça adicional e independente da qualidade do ar para esse grupo etário. A pneumonia adquirida na comunidade é reconhecida como causa relevante de hospitalização e mortalidade em idosos em todo o mundo, sendo frequentemente precipitada por infecções virais que comprometem os mecanismos de defesa do trato respiratório inferior e facilitam a superinfecção bacteriana (COUTO et al., 2024). Esse mecanismo é especialmente relevante para compreender um dos achados exploratórios desta dissertação, que sugeriu maior carga hospitalar por pneumonia em idosos justamente no período chuvoso, quando a qualidade do ar é melhor mas a circulação de patógenos respiratórios é mais intensa.

#### **4.3 Sazonalidade infecciosa no período chuvoso amazônico: fundamentos para um achado exploratório**

A compreensão do padrão de maior carga hospitalar por pneumonia em idosos no período chuvoso em Porto Velho exige ancoragem na literatura sobre sazonalidade de vírus respiratórios em

contextos tropicais úmidos. Em regiões de clima temperado, a transmissão de vírus respiratórios como influenza e RSV concentra-se nos meses frios e secos do inverno, quando a baixa umidade favorece a sobrevivência viral no ambiente e as pessoas permanecem mais tempo em ambientes fechados com menor ventilação (TAMERIUS et al., 2013). No entanto, em regiões tropicais, esse padrão se inverte: há dois tipos de condições ambientais associadas às epidemias sazonais de influenza: condições frias e secas, características de regiões temperadas, e condições úmidas e chuvosas, predominantes em regiões tropicais, onde os picos de atividade viral tendem a ocorrer durante a estação de maior precipitação e umidade relativa elevada.

Esse padrão de sazonalidade tropical das infecções respiratórias tem implicações diretas para o contexto de Porto Velho. Em locais tropicais, os picos de influenza têm sido observados durante a estação chuvosa, quando a umidade aumenta, enquanto em climas temperados a transmissão é maior em condições de baixa umidade. Para o RSV, os picos epidêmicos em regiões tropicais também tendem a ocorrer próximos à estação chuvosa, em padrão que espelha o observado para a influenza. A maior umidade relativa característica do período chuvoso amazônico favorece a sobrevivência e a transmissão de vírus respiratórios envelopados, como influenza e RSV, e aumenta a densidade de contatos interpessoais em ambientes fechados, amplificando as condições de transmissão comunitária desses patógenos.

No Brasil, o RSV é a principal causa de hospitalização por doenças respiratórias em crianças menores de cinco anos, com padrão sazonal bem definido associado ao período chuvoso na região Norte, conforme documentado por Moura et al. (2013). Embora esse agente seja classicamente associado à pediatria, seu papel como determinante de pneumonia em idosos tem sido crescentemente reconhecido na literatura. Aumentos na umidade impulsionados pela temperatura resultam em epidemias de RSV de menor intensidade em regiões temperadas, mas os surtos tornam-se mais graves em locais que experimentam precipitação extrema, geralmente nos trópicos. Esse dado sugere que em contextos amazônicos, onde o período chuvoso combina alta umidade relativa com precipitação intensa, as condições para transmissão e agravamento de infecções por RSV em populações vulneráveis, incluindo idosos, podem ser particularmente favoráveis.

A sazonalidade infecciosa do período chuvoso amazônico opera como um determinante de risco respiratório independente da poluição por queimadas, e sua magnitude pode superar, em escala mensal agregada, os efeitos do PM<sub>2,5</sub> sobre as internações por pneumonia em idosos. Esse fenômeno explica o aparente paradoxo documentado nesta dissertação: o período de melhor qualidade do ar concentra a maior carga hospitalar por pneumonia no grupo etário mais vulnerável. Longe de contradizer a literatura sobre os efeitos do PM<sub>2,5</sub>, esse achado revela que, em contextos amazônicos, o risco respiratório em idosos é determinado por dois mecanismos sazonais distintos que operam em períodos opostos do ano, demandando estratégias preventivas diferenciadas para cada contexto climático.

#### **4.4 Mecanismos fisiopatológicos da vulnerabilidade infantil ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas**

A vulnerabilidade das crianças ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas não se limita às características anatômicas e fisiológicas do sistema respiratório em desenvolvimento. Há uma dimensão imunológica e celular igualmente relevante que fundamenta o maior risco de hospitalização nesse grupo. Ao ser inalado, o PM<sub>2,5</sub> proveniente de queimadas deposita-se profundamente no trato respiratório, desencadeando processos inflamatórios e estresse oxidativo que podem resultar em lesão pulmonar e aumento da susceptibilidade a infecções. Em crianças, esse processo ocorre sobre um tecido pulmonar ainda em maturação, o que amplifica os danos potenciais e pode comprometer o desenvolvimento estrutural dos alvéolos e das vias aéreas de pequeno calibre.

Estudos recentes demonstraram que a exposição ao PM<sub>2,5</sub> induz alterações transcricionais específicas nas células pulmonares de crianças, comprometendo a função dos macrófagos alveolares, que são a principal linha de defesa inata do trato respiratório inferior. O comprometimento da imunidade inata nos pulmões de crianças expostas ao PM<sub>2,5</sub> pode aumentar a susceptibilidade a infecções respiratórias e às consequentes hospitalizações, uma vez que os macrófagos alveolares perdem progressivamente sua capacidade de defesa contra infecções bacterianas durante a exposição ao poluente. Esse mecanismo é particularmente relevante no contexto amazônico, onde crianças são expostas a episódios intensos e prolongados de PM<sub>2,5</sub> durante o período seco, podendo apresentar comprometimento da imunidade pulmonar que persiste além do período de exposição direta.

Estudo publicado na *Nature Communications* por Xu et al. (2025), abrangendo 1.012 comunidades em sete países e territórios, demonstrou que cada aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> no PM<sub>2,5</sub> de queimadas associou-se a elevação de 1,9% no risco de internação por doenças respiratórias em crianças e adolescentes, com riscos para condições respiratórias e infecciosas aumentando mesmo em níveis baixos de exposição, e crianças entre cinco e nove anos e aquelas residentes em áreas de menor nível socioeconômico sendo especialmente afetadas. Esse achado reforça que a vulnerabilidade infantil ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas é real, documentada em escala global incluindo o Brasil, e opera por mecanismos que combinam inflamação direta, comprometimento imunológico e maior susceptibilidade a infecções secundárias.

No contexto específico da Amazônia brasileira, Oliveira Alves et al. (2017) demonstraram, em estudo pioneiro com células pulmonares humanas expostas a material particulado coletado próximo a Porto Velho durante a estação de queimadas, que as partículas de biomassa amazônica causam danos ao DNA, morte celular por apoptose e necrose, e elevação expressiva de espécies reativas de oxigênio — efeitos mediados principalmente pelo reteno, um hidrocarboneto aromático policíclico presente em altas concentrações no PM<sub>2,5</sub> de queimadas amazônicas. Esse dado estabelece uma base experimental diretamente aplicável ao contexto de Porto Velho e confere plausibilidade biológica aos achados epidemiológicos sobre vulnerabilidade infantil documentados no presente estudo.

#### **4.5 Mecanismos fisiopatológicos da vulnerabilidade de idosos à pneumonia no período chuvoso**

A maior carga de internações por pneumonia em idosos no período chuvoso, um dos achados

exploratórios desta dissertação, encontra sustentação em mecanismos fisiopatológicos bem estabelecidos na literatura gerontológica e infectológica. A pneumonia gera impactos negativos consideráveis em idosos, e apesar do uso difundido de vacinas e antibióticos adequados, a morbidade e a mortalidade por pneumonia nesse grupo são significativamente mais elevadas do que nas populações mais jovens. A inflamação crônica de baixo grau associada ao envelhecimento, denominada na literatura gerontológica de *inflammaging*, amplia a susceptibilidade e a gravidade da pneumonia nessa faixa etária, comprometendo tanto a capacidade de resposta inicial à infecção quanto a resolução do processo inflamatório e favorecendo a progressão para formas graves que demandem hospitalização (MAGUIRE et al., 2025).

Em idosos não institucionalizados, a incidência anual de pneumonia varia de 25 a 44 casos por 1.000 habitantes, aproximadamente quatro vezes superior à observada em indivíduos com menos de 65 anos (MAGUIRE et al., 2025; JAIN et al., 2015). O *Streptococcus pneumoniae* é a principal causa de morte por pneumonia em adultos mais velhos, e o manejo dessas infecções é dificultado pela resposta imune comprometida a polissacarídeos e proteínas de superfície, agravada pela crescente resistência antimicrobiana (MAGUIRE et al., 2025). No contexto amazônico, a menor cobertura vacinal para pneumococo e influenza em populações idosas, especialmente em municípios com dificuldades de acesso aos serviços de saúde, pode ampliar adicionalmente o risco de hospitalização por pneumonia durante o período chuvoso, quando a circulação desses patógenos é mais intensa (COUTO et al., 2024).

O papel da fragilidade como determinante da susceptibilidade e gravidade da pneumonia em idosos é igualmente relevante para compreender os achados do presente estudo. A fragilidade, definida como estado de vulnerabilidade aumentada a estressores decorrente do declínio relacionado ao envelhecimento em múltiplos sistemas fisiológicos, está associada a maior risco de hospitalização e piores desfechos em episódios de pneumonia adquirida na comunidade (KOJIMA; ILIFFE; WALTERS, 2018). Em idosos frágeis, mesmo vírus de baixa virulência, como os que circulam predominantemente no período chuvoso amazônico, podem precipitar pneumonias graves com necessidade de internação hospitalar.

A interação entre imunossenescência, *inflammaging* e exposição sazonal a vírus respiratórios explica, do ponto de vista fisiopatológico, por que o período chuvoso representa maior risco de hospitalização por pneumonia para idosos em Porto Velho, independentemente da qualidade do ar. Durante os meses de maior precipitação e umidade, a circulação simultânea de influenza, RSV e outros vírus respiratórios cria uma pressão infecciosa sobre populações idosas com reserva imunológica reduzida, que não conseguem conter a progressão da infecção viral para pneumonia bacteriana secundária. Esse mecanismo de dupla vulnerabilidade, imunológica pelo envelhecimento e epidemiológica pela sazonalidade infecciosa tropical, constitui a base biológica que sustenta um dos achados exploratórios desta dissertação e distingue o contexto amazônico de regiões temperadas, onde o pico de internações por pneumonia em idosos tende a coincidir com o período de menor temperatura e maior poluição por fontes de combustão.

#### **4.6 Implicações para a vigilância em saúde de grupos vulneráveis em contexto amazônico**

O reconhecimento da dualidade de mecanismos que determinam o risco respiratório em crianças e idosos ao longo do ano em Porto Velho tem implicações práticas diretas para a organização dos serviços de saúde e para as estratégias de vigilância em saúde ambiental. Em crianças, o risco respiratório é bidirecional: no período seco, o comprometimento imunológico e a inflamação pulmonar induzidos pelo PM<sub>2,5</sub> de queimadas aumentam a susceptibilidade a infecções e a exacerbações de asma; no período chuvoso, a maior circulação de vírus respiratórios impõe risco adicional independente da qualidade do ar. Estratégias preventivas para esse grupo devem contemplar tanto a redução da exposição ao PM<sub>2,5</sub> durante o período seco, com uso de máscaras de proteção, restrição de atividades ao ar livre e melhoria da ventilação em ambientes escolares, quanto o fortalecimento da vacinação e da atenção primária nos meses chuvosos, quando as infecções respiratórias virais tendem a se intensificar.

Para os idosos, a vigilância em saúde deve ser estruturada de forma explicitamente sazonal e diferenciada. No período seco, a prioridade é proteger esse grupo da exposição ao PM<sub>2,5</sub>, monitorar a função respiratória em pacientes com doença pulmonar ou cardiovascular preexistente e ampliar o acesso a serviços de urgência para manejo de agravamentos. No período chuvoso, a ênfase deve recair sobre a prevenção de pneumonias por agentes infecciosos, com atenção especial à cobertura vacinal contra influenza e pneumococo, ao monitoramento de surtos de vírus respiratórios e à preparação da rede hospitalar para o aumento esperado na demanda por internações por pneumonia. Essa abordagem diferenciada por período climático representa uma contribuição prática desta dissertação para a vigilância em saúde ambiental em municípios amazônicos, e seu fundamento biológico está assentado nos mecanismos fisiopatológicos descritos neste capítulo.

## **CAPÍTULO V. SAZONALIDADE CLIMÁTICA NA AMAZÔNIA OCIDENTAL E SEUS DETERMINANTES PARA A SAÚDE**

### **5.1 Caracterização climática da Amazônia Ocidental e de Porto Velho**

Porto Velho, capital do estado de Rondônia, localiza-se na Amazônia Ocidental brasileira, às margens do rio Madeira, em posição geográfica que a situa no interior do denominado arco do desmatamento, faixa de transição entre a floresta tropical densa e as áreas de expansão agropecuária que avança desde o sul do Pará até o norte de Mato Grosso, passando por Rondônia e Acre. Essa posição confere ao município características climáticas e ambientais específicas que o diferenciam de outras cidades amazônicas e determinam um padrão sazonal de exposição ambiental particularmente intenso durante o período seco. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima de Porto Velho é do tipo tropical chuvoso Aw, com uma estação relativamente seca nos meses de junho a agosto, denominada regionalmente como verão. O regime pluviométrico anual é de aproximadamente 2.286 mm, sendo os três primeiros meses do ano os mais chuvosos e os meses de junho, julho e agosto os menos chuvosos, período que favorece a ocorrência de queimadas. A temperatura média mensal varia de 25,2°C a 26,6°C, sendo setembro o mês mais quente, e a umidade relativa média mensal nunca é inferior a 80% ao longo do ano, podendo, contudo, atingir valores mínimos diários de 20% nos meses mais secos, evidenciando a amplitude expressiva da variação sazonal desse parâmetro (CUNHA et al., 2006).

Essa variação da umidade relativa entre os períodos chuvoso e seco é um dos elementos mais relevantes do ponto de vista da saúde ambiental em Porto Velho. No período chuvoso, a umidade relativa elevada e sustentada, combinada com temperaturas médias entre 25°C e 27°C, cria condições atmosféricas que favorecem a dispersão de poluentes, mas também a sobrevivência e transmissão de vírus respiratórios. Estudos conduzidos em regiões tropicais demonstram que os vírus sincicial respiratório e influenza, cujos picos de circulação em contextos tropicais tendem a coincidir com os meses de maior precipitação e umidade relativa, impõem carga hospitalar expressiva sobre grupos vulneráveis durante o período chuvoso amazônico (TAMERIOUS et al., 2013; BAKER et al., 2019). No período seco, a queda abrupta da umidade relativa, que pode atingir valores inferiores a 30% em dias extremos, combina-se com a redução das chuvas e o aumento da temperatura para criar condições ideais à ignição e propagação de incêndios florestais, com consequências diretas sobre a qualidade do ar e sobre a saúde da população exposta. De acordo com Marengo et al. (2018), a Amazônia é vista como uma região em grande risco devido à variabilidade e às mudanças climáticas, e esse risco decorre não apenas das projeções de mudança climática global, mas também de interações sinérgicas com outras ameaças, como desmatamento, fragmentação florestal e incêndios detectados, que alteram os padrões de temperatura e precipitação em escala regional.

Do ponto de vista do gradiente climático amazônico, Porto Velho se situa em posição intermediária entre o núcleo úmido da Amazônia Central, onde as concentrações de PM<sub>2,5</sub> durante a estação chuvosa podem ser inferiores a 2 µg/m<sup>3</sup>, e as áreas de maior pressão de desmatamento e

queimadas do sul e leste da Amazônia. Artaxo et al. (2013), em estudo que comparou aerossóis atmosféricos em sítio de floresta preservada na Amazônia Central com sítio fortemente impactado por queimadas próximo a Porto Velho, documentaram que as concentrações de PM<sub>2,5</sub> no sítio de Porto Velho durante a estação seca foram aproximadamente dez vezes superiores às observadas no sítio de floresta preservada, evidenciando o impacto das queimadas sobre a qualidade do ar local e o posicionamento de Porto Velho como uma das cidades mais expostas ao PM<sub>2,5</sub> de biomassa da Amazônia. Jang e Jung (2023), em estudo conduzido especificamente em Porto Velho com dados do sensor PurpleAir entre 2020 e 2022, demonstraram que durante a estação de queimadas, de julho a outubro, a concentração média de PM<sub>2,5</sub> foi de 34,2 µg/m<sup>3</sup>, sete vezes superior à média do período úmido, com mais de 25% das concentrações elevadas acima de 100 µg/m<sup>3</sup> ocorrendo em agosto, quando a concentração média mensal atingiu 54,5 µg/m<sup>3</sup>, superando amplamente os padrões estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde e pela Resolução CONAMA n° 506/2024.

## **5.2 Porto Velho no contexto do arco do desmatamento e transporte regional de poluentes**

A posição de Porto Velho no interior do arco do desmatamento tem implicação adicional para a qualidade do ar: a cidade não é afetada apenas pelos focos de queimadas locais, mas também pelo transporte de fumaça proveniente de regiões vizinhas. Jang e Jung (2023) demonstraram, por meio de análise de rastreamento de massas de ar, que o PM<sub>2,5</sub> em Porto Velho recebe contribuições de regiões do norte e centro-oeste do Brasil, além de áreas do Paraguai e Bolívia, sendo as concentrações mais elevadas associadas a ventos de direção oeste e norte que transportam fumaça de queimadas realizadas em extensas áreas do sul da Amazônia. Esse padrão de transporte regional indica que a exposição da população de Porto Velho ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas não depende exclusivamente dos focos locais, mas é amplificada pelo contexto regional de desmatamento e queima de biomassa em toda a Amazônia sul-ocidental. Butt et al. (2020), em estudo sobre os impactos das queimadas amazônicas sobre a qualidade do ar e a saúde pública, documentaram que, antes da estação seca, de maio a julho, as concentrações de PM<sub>2,5</sub> medidas em Porto Velho são tipicamente inferiores a 3 µg/m<sup>3</sup>, atingindo valores de pico entre 30 e 50 µg/m<sup>3</sup> em agosto e setembro, com declínio para menos de 10 µg/m<sup>3</sup> no início de outubro, descrevendo um ciclo sazonal abrupto e de grande magnitude que representa uma das maiores variações intra-anuais de PM<sub>2,5</sub> documentadas em cidades brasileiras.

A recente literatura sobre PM<sub>2,5</sub> em capitais amazônicas reforça a posição de Porto Velho como um dos contextos de maior exposição sazonal da Amazônia brasileira. De acordo com estudo publicado em 2026 que analisou mortalidade cardiorrespiratória nas capitais amazônicas, Porto Velho registrou consistentemente alguns dos níveis mais elevados de PM<sub>2,5</sub> e maior frequência de dias de poluição grave entre todas as capitais analisadas, especialmente durante a estação seca, padrão que corresponde às condições climáticas locais de marcada redução da precipitação durante os meses de maior atividade de queimadas (REQUIA et al., 2021). Ribeiro et al. (2024), ao analisar o impacto das queimadas amazônicas sobre a saúde respiratória na Amazônia Legal entre 2009 e 2019, documentaram que a estação de queimadas, de agosto a dezembro, concentrou 85% do total de focos registrados no período,

e que durante essa estação uma parcela expressiva das internações hospitalares por doenças respiratórias recaiu sobre crianças de 0 a 14 anos e idosos com 60 anos ou mais, os dois grupos populacionais estudados nesta dissertação.

### **5.3 Sazonalidade das queimadas e seus determinantes climáticos e antrópicos**

A sazonalidade das queimadas na Amazônia Ocidental resulta da interação entre fatores climáticos e antrópicos que se reforçam mutuamente durante o período seco. Do ponto de vista climático, a redução da precipitação, a queda da umidade relativa e o aumento da temperatura criam condições físicas favoráveis à ignição e propagação do fogo, reduzindo o teor de umidade da biomassa e aumentando a flamabilidade da vegetação (MARENGO et al., 2018). Do ponto de vista antrópico, o período seco é historicamente utilizado para a limpeza de áreas desmatadas por meio do fogo, prática associada à expansão agropecuária e ao uso do solo para pastagem e agricultura, que se intensificaram nas últimas décadas no estado de Rondônia (GONÇALVES; CASTRO; HACON, 2012). A combinação desses dois fatores, condições climáticas favoráveis e práticas de manejo do fogo, explica a concentração dos focos de queimadas nos meses de julho a outubro, com pico em agosto e setembro, padrão documentado de forma consistente na literatura nacional e confirmado pelos dados do presente estudo.

Marengo et al. (2018) destacam que o risco de incêndios florestais na Amazônia está aumentando em decorrência das mudanças climáticas globais e da interação com o desmatamento, com projeções de prolongamento e intensificação da estação seca para as próximas décadas. Eventos de seca extrema associados ao fenômeno El Niño, como os registrados em 2005, 2010, 2015 e 2024, têm sido responsáveis por temporadas de queimadas de magnitude excepcional, com impactos expressivos sobre a qualidade do ar e a saúde da população amazônica. Saravia et al. (2025) alertam que o desmatamento e as mudanças climáticas podem aumentar significativamente a frequência e a intensidade dos incêndios na Amazônia, tornando ainda mais urgente a compreensão dos mecanismos pelos quais a sazonalidade das queimadas se associa à carga hospitalar em grupos vulneráveis.

### **5.4 Sazonalidade infecciosa no período chuvoso amazônico e seus determinantes para a saúde**

A compreensão da sazonalidade climática amazônica como determinante de saúde não se limita ao período seco e à poluição por queimadas. O período chuvoso, caracterizado por precipitação abundante, alta umidade relativa e maior densidade de contatos interpessoais em ambientes fechados, configura um contexto de risco infeccioso distinto e igualmente relevante para grupos vulneráveis, especialmente idosos. Em regiões tropicais, ao contrário do que ocorre em climas temperados, os vírus respiratórios como influenza e RSV tendem a circular com maior intensidade durante os meses de maior precipitação e umidade, e não durante o inverno frio e seco (TAMERIUS et al., 2013). Tamerius et al. (2013), em análise de dados de vigilância de influenza em 78 localidades globais, identificaram dois tipos de condições ambientais associadas aos picos sazonais de influenza: condições frias e secas, predominantes em regiões temperadas, e condições úmidas e chuvosas, predominantes em regiões

tropicais, onde os surtos tendem a ocorrer durante a estação de maior precipitação, exatamente o padrão esperado para Porto Velho durante o período chuvoso.

Baker et al. (2019), em estudo sobre a dinâmica epidêmica do RSV em diferentes contextos climáticos, demonstraram que em locais tropicais os picos epidêmicos de RSV também tendem a ocorrer próximos à estação chuvosa, em padrão que espelha o observado para a influenza, e que aumentos na umidade impulsionados pela temperatura resultam em mudanças na intensidade e na distribuição temporal dos surtos de RSV. Moura et al. (2013), em estudo sobre a sazonalidade do RSV no Brasil, documentaram padrão de circulação viral associado ao período chuvoso nas regiões Norte e Centro-Oeste, com pico de internações por bronquiolite e pneumonia em crianças coincidindo com a estação de maior precipitação. Esse conjunto de evidências fornece a base epidemiológica e climatológica para compreender por que o período chuvoso de Porto Velho pode concentrar maior carga hospitalar por pneumonia em idosos, grupo para o qual a infecção por vírus respiratórios representa risco significativo de progressão para formas graves que demandem hospitalização.

### **5.5 Dualidade sazonal como conceito estruturante para a vigilância em saúde ambiental amazônica**

A caracterização climática de Porto Velho e da Amazônia Ocidental revela que a sazonalidade não é apenas um fenômeno meteorológico, mas um determinante estrutural da saúde ambiental na região. Os dois períodos climáticos, chuvoso e seco, não diferem apenas em termos de precipitação e temperatura, mas configuram contextos ambientais e epidemiológicos radicalmente distintos, com mecanismos de risco específicos para grupos vulneráveis. No período seco, o risco é predominantemente ambiental, mediado pela exposição ao PM<sub>2,5</sub> de queimadas e seus efeitos sobre o sistema respiratório e cardiovascular de crianças e idosos. No período chuvoso, o risco é predominantemente infeccioso e climático, mediado pela circulação de vírus respiratórios em condições de alta umidade e maior densidade de contatos interpessoais, com impacto especialmente relevante sobre idosos em razão da imunossenescência e da maior susceptibilidade a formas graves de pneumonia.

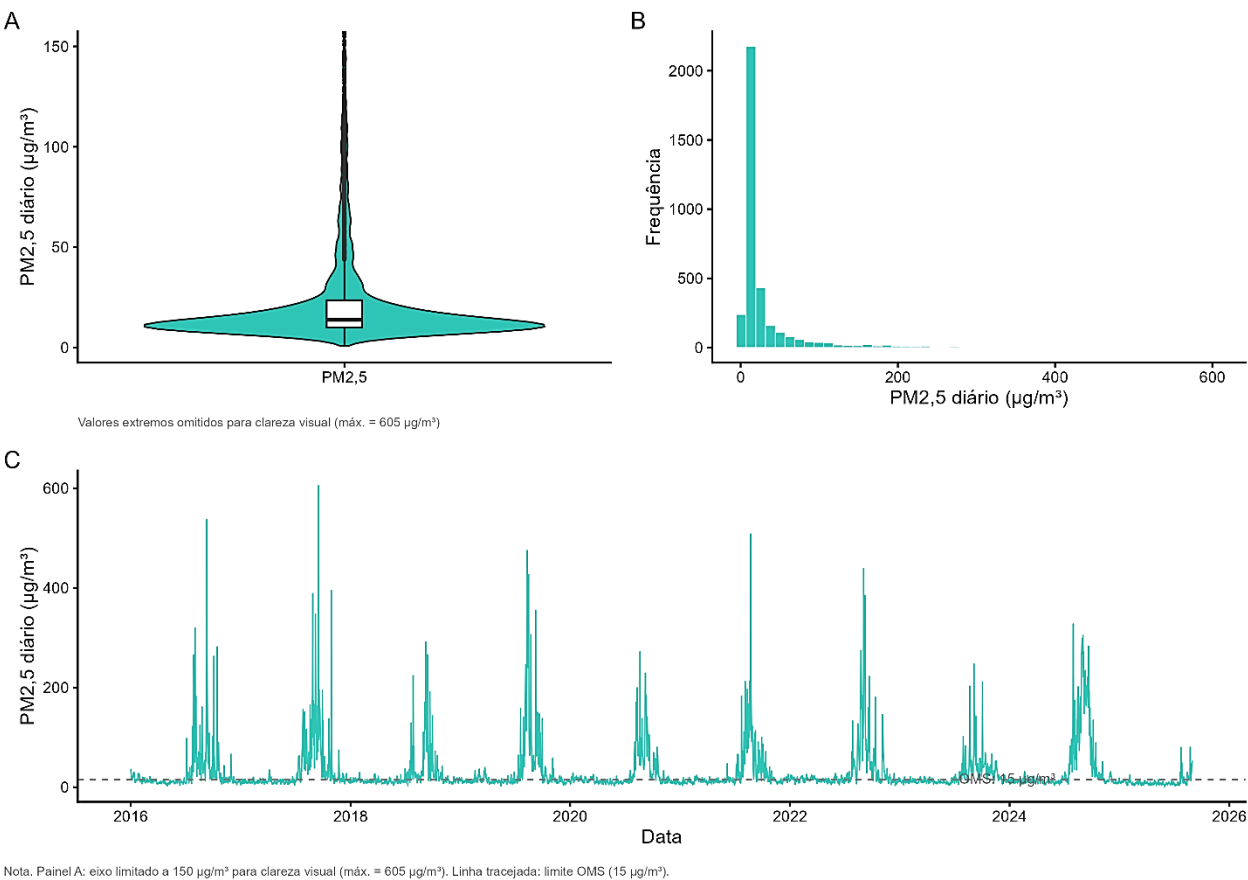
Esse conceito de dualidade sazonal do risco à saúde em contextos amazônicos tem implicações diretas para a organização dos sistemas de vigilância em saúde ambiental. Couto et al. (2024), em estudo espaço-temporal sobre internações e mortalidade por doenças respiratórias na Amazônia Legal, documentaram que pneumonia foi a principal causa de mortalidade em idosos na região, com os grupos etários extremos apresentando maior vulnerabilidade, padrão coerente com a dualidade sazonal descrita neste capítulo. A vigilância em saúde ambiental em municípios amazônicos como Porto Velho precisa, portanto, contemplar ações diferenciadas para cada contexto climático: proteção contra a poluição atmosférica no período seco e prevenção de infecções respiratórias no período chuvoso, com foco especial nos grupos vulneráveis identificados nesta dissertação.

CAPÍTULO VI. RESULTADOS

O banco de dados analisado compreendeu 3.531 dias de observação contínua, de 1º de janeiro de 2016 a 31 de agosto de 2025. Foram investigados os desfechos cardiopulmonares diários de internação hospitalar em crianças e idosos. A Tabela 1 apresenta as características descritivas das variáveis de exposição, meteorológicas e dos desfechos segundo ano e período sazonal.

A Figura 3 apresenta a distribuição e a evolução temporal das concentrações diárias de PM<sub>2,5</sub> em Porto Velho ao longo de dez anos de observação. O Painei A evidencia distribuição fortemente assimétrica à direita, com mediana próxima a 10 µg/m³ e cauda superior estendida até 605 µg/m³ em episódios extremos de queimada. O Painei C ilustra a série temporal diária, revelando padrão sazonal marcado e recorrente: picos agudos de PM<sub>2,5</sub> ocorrem sistematicamente entre julho e outubro, correspondendo ao período seco. A linha de referência da OMS (15 µg/m³) é superada em todos os anos do período analisado, com concentrações particularmente elevadas em 2017, 2018, 2020, 2022 e 2024.

Figura 3 – Distribuição e série temporal diária do PM<sub>2,5</sub> em Porto Velho, RO, 2016–2025.

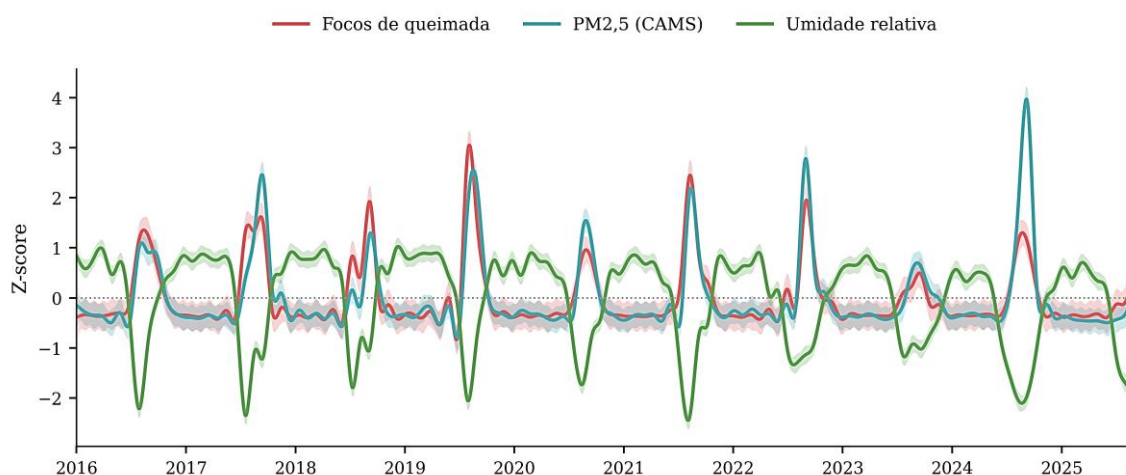


Fonte: elaborada pela autora. PM<sub>2,5</sub>: CAMS EAC4 (Copernicus/ECMWF). Painei A: eixo limitado a 150 µg/m³ (máx. = 605 µg/m³). Linha tracejada: limite OMS (15 µg/m³).

A Figura 4 apresenta a evolução temporal simultânea do PM<sub>2,5</sub>, umidade relativa e focos de

queimada em Z-score. Os picos de PM<sub>2,5</sub> e de focos coincidem entre julho e outubro, enquanto a umidade relativa atinge seus valores mínimos nesses intervalos, confirmando o caráter pirogênico predominante da exposição no período seco.

**Figura 4 – Séries temporais suavizadas por GAM (spline cúbico,  $k = 120$ ) de PM<sub>2,5</sub>, umidade relativa e focos de queimada em Z-score. Porto Velho, RO, 2016–2025.**



Fonte: elaborada pela autora. PM<sub>2,5</sub>: CAMS EAC4 (Copernicus/ECMWF). Meteorologia: ERA5 (ECMWF). Focos de queimada: MODIS Collection 6.1/NASA FIRMS.

### 6.1 Análise principal: PM<sub>2,5</sub> e internações por asma em crianças

O modelo DLNM quasi-Poisson com lag acumulado de 0 a 7 dias identificou associação positiva e estatisticamente significativa entre PM<sub>2,5</sub> e internações por asma em crianças. A cada aumento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na concentração diária de PM<sub>2,5</sub>, a taxa de internações por asma em crianças aumentou 5,6% nos sete dias subsequentes (IRR = 1,056; IC 95%: 1,019–1,094). Esse foi o único desfecho da análise principal com IC 95% que não cruzou a unidade. Os demais desfechos apresentaram resultados nulos, com IRRs próximos à unidade e IC 95% cruzando 1 em todas as janelas de lag testadas.

A análise de sensibilidade com lag ampliado de 0 a 14 dias confirmou e amplificou o achado principal (IRR = 1,063; IC 95%: 1,015–1,112), sem evidência de reversão do sinal que caracterizaria colheita prematura.

### 6.2 Modificação de efeito pela sazonalidade e pela carga de queimadas

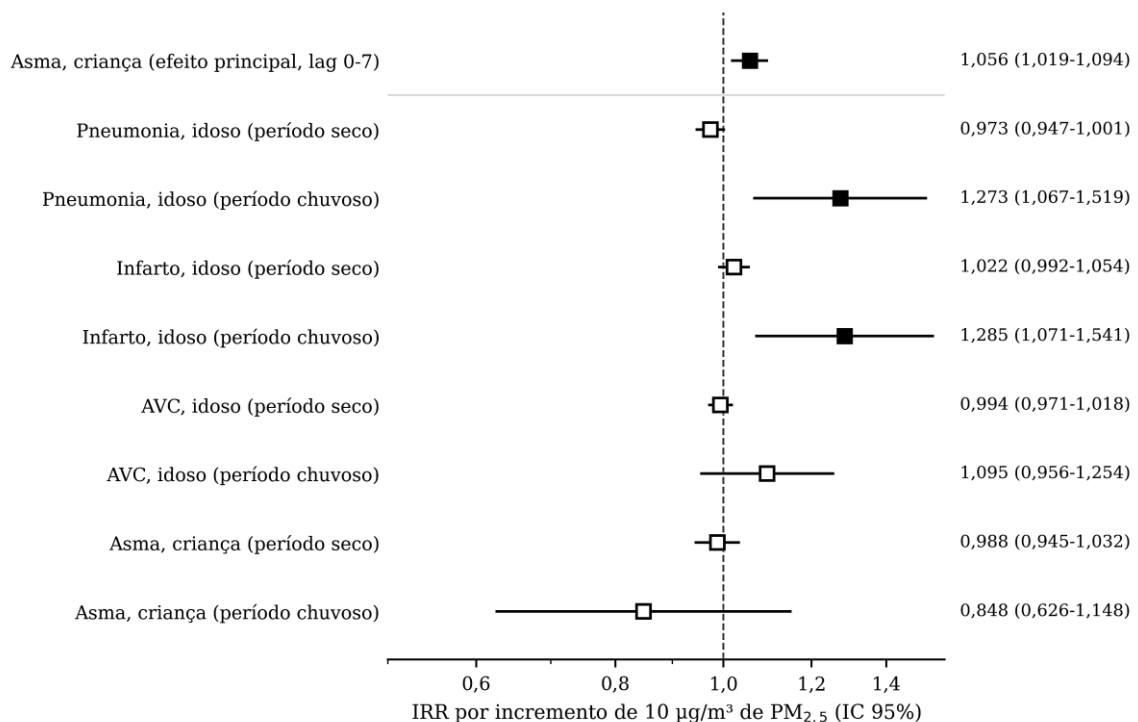
Nenhuma das interações testadas atingiu significância estatística pelo quasi-likelihood F-test. O menor valor de p observado foi para as internações por infarto em idosos ( $p = 0,280$ ). Assim, este estudo não confirmou modificação de efeito por sazonalidade nem por carga de queimadas, e todos os sinais estratificados descritos a seguir são interpretados como exploratórios e geradores de hipótese.

Na modificação pelo período sazonal, o teste formal de interação foi não significativo para todos

os desfechos. Em particular, os dois desfechos para os quais uma diferença sazonal poderia ser esperada, as internações por pneumonia em crianças e por AVC em idosos, não apresentaram interação significativa ( $p = 0,421$  e  $p = 0,585$ , respectivamente). O teste formal de interação avalia se o efeito do  $PM_{2,5}$  difere entre os estratos, e não a significância do efeito dentro de cada estrato; sua não significância indica ausência de evidência estatística de efeito diferencial entre os períodos, ainda que a estimativa pontual de um estrato isolado possa apresentar IC 95% que exclua a unidade.

Ainda assim, entre os idosos, as estimativas estratificadas do período chuvoso apresentaram IC 95% que não incluiu a unidade em cada estrato isolado: internações por infarto (IRR = 1,285; IC 95%: 1,071-1,541;  $p$  de interação = 0,280) e por pneumonia (IRR = 1,273; IC 95%: 1,066-1,519;  $p$  de interação = 0,469). Esses dois sinais são interpretados como exploratórios. Em contraste, a ausência de modificação de efeito por alta carga de queimadas para asma em crianças (IRR = 0,970; IC 95%: 0,905-1,041;  $p = 0,488$ ) reforça que o efeito do  $PM_{2,5}$  sobre as vias aéreas pediátricas opera de forma consistente ao longo do ano. Os resultados completos são apresentados na Tabela 2.

**Figura 5 – Efeito do  $PM_{2,5}$  sobre desfechos cardiopulmonares: efeito principal e estratificação por período sazonal. Porto Velho, RO, 2016-2025.**



Fonte: elaborada pela autora. Gráfico de floresta das razões de incidência (IRR) por incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{2,5}$ , efeito acumulado no lag 0-7 dias. Marcadores preenchidos: IC 95% não inclui 1,0; marcadores vazados: IC 95% inclui 1,0. As estimativas estratificadas são exploratórias, pois nenhum teste de interação atingiu significância estatística.

A Figura 5 apresenta, em gráfico de floresta, o efeito principal do  $PM_{2,5}$  sobre as internações

por asma em crianças e a estratificação por período sazonal (seco e chuvoso) dos principais desfechos cardiorrespiratórios, com as respectivas razões de incidência e intervalos de confiança de 95% (por incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lag 0-7 dias). A linha tracejada em  $\text{IRR} = 1,0$  demarca a ausência de efeito; marcadores preenchidos indicam estimativas cujo IC 95% não inclui a unidade e marcadores vazados indicam associações não significativas.

O efeito principal sobre a asma em crianças ( $\text{IRR} = 1,056$ ; IC 95%: 1,019-1,094) é o único com IC 95% que exclui a unidade. Na estratificação sazonal, esse efeito não se concentra em uma estação específica (período seco:  $\text{IRR} = 0,988$ ; IC 95%: 0,945-1,032; período chuvoso:  $\text{IRR} = 0,848$ ; IC 95%: 0,626-1,148;  $p$  de interação = 0,988), o que indica efeito distribuído ao longo de todo o ano, e não amplificado por um estrato sazonal. Entre os idosos, as internações por pneumonia e por infarto apresentaram, no período chuvoso, estimativas de maior magnitude com IC 95% excluindo a unidade (pneumonia:  $\text{IRR} = 1,273$ ; IC 95%: 1,066-1,519; infarto:  $\text{IRR} = 1,285$ ; IC 95%: 1,071-1,541), enquanto no período seco as estimativas foram próximas da unidade.

As internações por AVC em idosos não apresentaram associação em nenhum dos estratos (período seco:  $\text{IRR} = 0,994$ ; IC 95%: 0,971-1,018; período chuvoso:  $\text{IRR} = 1,095$ ; IC 95%: 0,956-1,254). Em nenhum caso o teste formal de interação atingiu significância estatística (menor  $p = 0,280$ , para infarto em idosos), de modo que os sinais concentrados no período chuvoso entre os idosos devem ser interpretados como exploratórios e geradores de hipótese. Em conjunto, a figura evidencia que o  $\text{PM}_{2,5}$  não produz efeito uniforme entre desfechos e estratos: a vulnerabilidade respiratória de crianças aparece diretamente no efeito principal, ao longo de todo o ano, enquanto entre os idosos as estimativas do período chuvoso para infarto e pneumonia excluem a unidade apenas em caráter exploratório, sugerindo, como hipótese a ser testada, interação entre exposição ao  $\text{PM}_{2,5}$  e contexto infeccioso sazonal.

**Tabela 1**

Características descritivas das variáveis de exposição, meteorológicas e dos desfechos cardiorrespiratórios segundo, ano e período sazonal. Porto Velho, RO, 2016–2025.

| Variável de estudo                                 | Total            | 2016             | 2017             | 2018             | 2019             | 2020             | 2021             | 2022             | 2023             | 2024             | 2025 <sup>a</sup> | Período Seco  | Período Chuvoso |
|----------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|---------------|-----------------|
| <i>N</i> (dias)                                    | 3.531            | 366              | 365              | 365              | 365              | 366              | 365              | 365              | 365              | 366              | 243               | 1.779         | 1.752           |
| PM2,5 (µg/m <sup>3</sup> ), média (DP)             | 29,44<br>(47,29) | 28,86<br>(48,77) | 35,10<br>(58,39) | 24,07<br>(33,56) | 34,19<br>(59,22) | 26,32<br>(35,36) | 29,38<br>(44,53) | 33,55<br>(50,81) | 23,58<br>(26,44) | 42,48<br>(64,10) | 10,54<br>(9,66)   | 44,87 (62,42) | 13,78 (7,99)    |
| Temperatura (°C), média (DP)                       | 26,49<br>(1,39)  | 26,57<br>(1,23)  | 26,40<br>(1,31)  | 26,07<br>(1,19)  | 26,41<br>(1,10)  | 26,49<br>(1,31)  | 26,22<br>(1,40)  | 26,21<br>(1,39)  | 26,82<br>(1,74)  | 27,27<br>(1,49)  | 26,35<br>(1,13)   | 26,85 (1,60)  | 26,12 (1,01)    |
| Umidade relativa (%), média (DP)                   | 80,23<br>(10,79) | 81,90<br>(10,87) | 81,03<br>(11,78) | 82,57<br>(10,31) | 82,77<br>(10,32) | 80,88<br>(9,47)  | 79,84<br>(11,61) | 79,01<br>(10,11) | 79,54<br>(8,83)  | 75,85<br>(11,21) | 78,30<br>(11,53)  | 73,61 (10,98) | 86,96 (4,73)    |
| Focos de queimada (MODIS), soma                    | 11.828           | 1.373            | 1.552            | 1.333            | 1.648            | 889              | 1.573            | 1.315            | 704              | 1.167            | 274               | 11.344        | 484             |
| Int. asma — criança (J45–J46), média/dia (DP)      | 0,30<br>(0,62)   | 0,31<br>(0,60)   | 0,26<br>(0,54)   | 0,26<br>(0,51)   | 0,29<br>(0,58)   | 0,14<br>(0,43)   | 0,25<br>(0,53)   | 0,41<br>(0,72)   | 0,50<br>(0,84)   | 0,28<br>(0,67)   | 0,35<br>(0,60)    | 0,28 (0,56)   | 0,33 (0,68)     |
| Int. pneumonia — criança (J12–J18), média/dia (DP) | 1,83<br>(1,75)   | 2,33<br>(2,03)   | 2,66<br>(1,80)   | 2,11<br>(1,68)   | 2,21<br>(1,70)   | 0,68<br>(1,03)   | 0,92<br>(1,04)   | 1,72<br>(1,83)   | 2,14<br>(1,84)   | 1,57<br>(1,59)   | 2,10<br>(1,61)    | 1,91 (1,77)   | 1,76 (1,73)     |
| Int. pneumonia — idoso (J12–J18), média/dia (DP)   | 0,81<br>(0,99)   | 0,98<br>(1,05)   | 1,02<br>(1,06)   | 0,76<br>(0,94)   | 0,87<br>(1,01)   | 0,72<br>(1,01)   | 0,61<br>(0,90)   | 0,73<br>(0,96)   | 0,93<br>(1,06)   | 0,73<br>(0,89)   | 0,76<br>(0,91)    | 0,74 (0,91)   | 0,89 (1,06)     |
| Int. AVC — idoso (I60–I69), média/dia (DP)         | 1,13<br>(1,15)   | 1,02<br>(1,01)   | 0,74<br>(0,90)   | 0,70<br>(0,92)   | 0,90<br>(1,04)   | 1,19<br>(1,16)   | 1,39<br>(1,15)   | 1,45<br>(1,32)   | 1,59<br>(1,31)   | 1,17<br>(1,20)   | 1,14<br>(1,09)    | 1,13 (1,16)   | 1,13 (1,15)     |
| Int. infarto — idoso (I21–I23), média/dia (DP)     | 0,68<br>(0,96)   | 0,43<br>(0,71)   | 0,32<br>(0,61)   | 0,56<br>(0,84)   | 0,50<br>(0,72)   | 0,51<br>(0,80)   | 0,80<br>(0,99)   | 0,89<br>(1,01)   | 1,28<br>(1,30)   | 0,89<br>(1,18)   | 0,52<br>(0,74)    | 0,66 (0,94)   | 0,69 (0,98)     |

*Nota.* DP = desvio padrão. Período seco: maio a outubro (*N* = 1.779 dias). Período chuvoso: novembro a abril (*N* = 1.752 dias). CID-10: asma J45-J46; pneumonia J12-J18; AVC I60-I69; infarto I21-I23. <sup>a</sup> 2025: dados parciais (janeiro a agosto; *N* = 243 dias).

*Fonte:* PM2,5: CAMS EAC4 (Copernicus/ECMWF). Meteorologia: ERA5 (ECMWF). Focos de queimada: MODIS Collection 6.1/NASA FIRMS, satélite Aqua. Internações: SIH/SUS.

**Tabela 2**

Resultados da análise principal, de sensibilidade e de modificação de efeito por sazonalidade e carga de queimadas. Porto Velho, RO, 2016–2025.

| Desfecho                                                 | Análise /<br>Moderador         | IRR (IC 95%)            | N<br>eventos | p<br>interação | Sig. |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------|----------------|------|
| <b>A. Análise principal — DLNM lag 0–7 dias</b>          |                                |                         |              |                |      |
| Int. asma — criança                                      | Principal                      | 1,056 (1,019–<br>1,094) | 1.074        | —              | *    |
| Int. pneumonia — idoso                                   | Principal                      | 0,993 (0,970–<br>1,017) | 2.875        | —              | ns   |
| Int. AVC — idoso                                         | Principal                      | 0,991 (0,972–<br>1,010) | 3.985        | —              | ns   |
| Int. infarto — idoso                                     | Principal                      | 1,005 (0,981–<br>1,030) | 2.389        | —              | ns   |
| <b>B. Análise de sensibilidade — DLNM lag 0–14 dias</b>  |                                |                         |              |                |      |
| Int. asma — criança                                      | Sensibilidade                  | 1,063 (1,015–<br>1,112) | 1.074        | —              | *    |
| <b>C. Modificação de efeito (análises exploratórias)</b> |                                |                         |              |                |      |
| Int. infarto — idoso                                     | Período<br>chuvoso             | 1,285 (1,071–<br>1,541) | —            | 0,280          | *    |
| Int. pneumonia — idoso                                   | Período<br>chuvoso             | 1,273 (1,066–<br>1,519) | —            | 0,469          | *    |
| Int. asma — criança                                      | Alta queimada<br>(focos > P75) | 0,970 (0,905–<br>1,041) | —            | 0,488          | ns   |

*Nota.* IRR = Incidence Rate Ratio por aumento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2,5}$ . Modelos GAM quasi-Poisson ajustados por tendência secular (ns, 7 df/ano), temperatura, umidade relativa e dia da semana. p interação = quasi-likelihood F-test. \* IC 95% não inclui 1,0; ns = não significativo; — = não aplicável. Alta queimada: focos > P75 = 4 focos/dia (N = 819 dias). Nenhuma das interações testadas atingiu significância estatística (menor p = 0,280); os achados do Bloco C são interpretados como exploratórios. Software: R (pacotes dlnm e mgcv).

A Tabela 2 consolida os resultados das análises principal, de sensibilidade e de modificação de efeito por sazonalidade e carga de queimadas para os desfechos cardiorrespiratórios avaliados em Porto Velho (RO), no período de 2016 a 2025.

O Bloco A apresenta os resultados da análise principal pelo modelo DLNM quasi-Poisson com lag acumulado de 0 a 7 dias. Entre os quatro desfechos primários avaliados, apenas as internações por asma em crianças demonstraram associação estatisticamente significativa com o PM<sub>2,5</sub>, com razão de incidência de 1,056 (IC95%: 1,019-1,094) por incremento de 10 µg/m<sup>3</sup>, correspondendo a aumento de 5,6% no risco de hospitalização. Os demais desfechos primários, internações por pneumonia em idosos (IRR = 0,993; IC95%: 0,970-1,017), internações por AVC em idosos (IRR = 0,991; IC95%: 0,972-1,010) e internações por infarto em idosos (IRR = 1,005; IC95%: 0,981-1,030), apresentaram IC95% cruzando a unidade, configurando resultados nulos na série completa.

O Bloco B apresenta a análise de sensibilidade com lag ampliado de 0 a 14 dias para o desfecho de asma pediátrica. O efeito manteve-se significativo e de magnitude ligeiramente superior (IRR = 1,063; IC95%: 1,015–1,112), sem reversão do sinal, o que afasta o fenômeno de colheita prematura e reforça a robustez do achado principal.

O Bloco C reúne as estimativas de modificação de efeito, todas de caráter exploratório, uma vez que nenhum teste formal de interação atingiu significância estatística. As internações por infarto em idosos no período chuvoso (IRR = 1,285; IC 95%: 1,071-1,541; p de interação = 0,280) e as internações por pneumonia em idosos no período chuvoso (IRR = 1,273; IC 95%: 1,066-1,519; p de interação = 0,469) apresentaram IC 95% que exclui a unidade no estrato isolado, sem confirmação da interação. A ausência de modificação de efeito por alta carga de queimadas para asma em crianças (IRR = 0,970; IC 95%: 0,905-1,041; p de interação = 0,488) reforça que o efeito do PM<sub>2,5</sub> sobre as vias aéreas pediátricas opera de forma consistente ao longo de todo o ano, independentemente da intensidade das queimadas mensurada pelos focos MODIS.

Em conjunto, os resultados indicam vulnerabilidade seletiva por faixa etária e sazonalidade: o efeito do PM<sub>2,5</sub> sobre crianças opera predominantemente por mecanismo irritativo-broncoespástico contínuo, evidente na análise principal, enquanto entre os idosos os sinais se concentram no período chuvoso, em caráter exploratório, quando fatores infecciosos e imunológicos sazonais podem potencializar a resposta ao poluente. Todos os achados de modificação de efeito devem ser interpretados como geradores de hipótese, e não como evidência confirmatória, dada a ausência de significância nos testes formais de interação e o número de comparações realizadas.

## CAPÍTULO VII. DISCUSSÃO

### 7.1 Síntese dos achados principais

O presente estudo investigou as associações de curto prazo entre PM<sub>2,5</sub> e desfechos cardiorrespiratórios em Porto Velho, Rondônia, em série temporal de 3.531 dias (2016-2025), utilizando modelo DLNM com GAM quasi-Poisson, replicando Coker et al. (2022). Trata-se da série temporal diária de PM<sub>2,5</sub> com maior período de cobertura já conduzida para um município da Amazônia Ocidental brasileira, integrando cinco fontes de dados atmosféricos e epidemiológicos e incorporando análises de modificação de efeito por sazonalidade e carga de queimadas. O único desfecho com IC95% que não cruzou a unidade na análise principal foi internações por asma em crianças (IRR = 1,056; IC95%: 1,019-1,094 por 10 µg/m<sup>3</sup>, lag 0-7). Os demais desfechos primários apresentaram resultados nulos na série completa.

As análises de modificação de efeito não confirmaram, em nenhum caso, modificação estatisticamente significativa: nenhum teste formal de interação atingiu significância (menor  $p = 0,280$ ). Ainda assim, entre os idosos, as estimativas estratificadas identificaram sinais de maior magnitude no período chuvoso, com IC 95% que excluiu a unidade no estrato isolado: internações por infarto (IRR = 1,285; IC 95%: 1,071-1,541) e por pneumonia (IRR = 1,273; IC 95%: 1,066-1,519). Esses sinais são classificados como exploratórios e devem ser interpretados com cautela, e são detalhados na seção 7.4.

Porto Velho concentra o maior nível de exposição ao PM<sub>2,5</sub> entre as capitais amazônicas. Silveira et al. (2026) registraram concentração média de 49,69 µg/m<sup>3</sup> em Porto Velho em 2021, a mais elevada entre sete capitais da Amazônia brasileira, e estimaram 5.472 mortes circulatórias e 2.621 mortes respiratórias atribuíveis ao PM<sub>2,5</sub> nessa região no período 2018-2023. A concentração média observada na presente série foi de 29,44 µg/m<sup>3</sup> (DP: 47,29; máx.: 605,14 µg/m<sup>3</sup>), superando a diretriz da OMS (15 µg/m<sup>3</sup>) em todos os anos analisados.

### 7.2 PM<sub>2,5</sub> e internações por asma em crianças: comparação com a literatura e plausibilidade biológica

O IRR de 1,056 para asma pediátrica é comparável ao de Coker et al. (2022), que identificaram aumento de 5,4% nas internações respiratórias no lag 2 e 5,8% no lag 3 por 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2,5</sub> em Rio Branco (Acre), com GAM quasi-Poisson e DLNM. O presente estudo replica essa abordagem estatística, diferindo na fonte de exposição: enquanto Coker et al. (2022) utilizaram sensor de superfície PurpleAir, o presente estudo adotou o CAMS EAC4

como fonte exclusiva, necessário pela ausência de série contínua de monitoramento terrestre para Porto Velho no período completo. A convergência das estimativas entre os dois estudos, conduzidos em municípios distintos da Amazônia Ocidental com fontes de dados diferentes, confere consistência ao achado.

Ye et al. (2021), em estudo nacional em 1.814 municípios brasileiros (2000-2015), estimaram incremento de 1,65% nas internações por todas as causas e 5,09% nas respiratórias por 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2,5}$  de queimadas, com maiores efeitos em crianças de 0 a 4 anos e idosos acima de 80 anos. Guo et al. (2023), em abordagem causal por diferença-em-diferenças nas mesmas 1.814 cidades, estimaram aumento de 1,06% nas internações por todas as causas no lag 0-3, com carga atribuível de 1,26% do total de hospitalizações. O presente estudo avança ao estratificar o efeito especificamente para asma pediátrica (0 a 14 anos), desfecho não isolado nas análises nacionais, em série de quase dez anos de um município amazônico de alta exposição.

A especificidade do efeito para asma e não para pneumonia pediátrica é biologicamente coerente. O  $\text{PM}_{2,5}$  penetra profundamente nas vias aéreas inferiores e alvéolos, desencadeando resposta inflamatória que exacerba a hiperresponsividade brônquica característica da asma, mecanismo irritativo-broncoespástico distinto do infeccioso-inflamatório que predomina na pneumonia. Crianças apresentam maior ventilação por unidade de superfície corporal, vias aéreas proporcionalmente mais estreitas e maior tempo em atividades ao ar livre, ampliando a dose inalada efetiva, condições que potencializam o efeito obstrutivo do  $\text{PM}_{2,5}$  sobre vias já hiperreativas.

A análise de sensibilidade com lag ampliado para 0 a 14 dias confirmou o achado principal (IRR = 1,063; IC95%: 1,015-1,112) sem reversão do sinal, indicando ausência de colheita prematura para asma pediátrica. A mesma análise de sensibilidade foi conduzida para os desfechos cardiovasculares em idosos (AVC e infarto), conforme previsto nos objetivos específicos; os resultados não diferiram substancialmente das estimativas com lag 0-7 dias, mantendo os IC95% cruzando a unidade em todos os desfechos, razão pela qual esses resultados não foram incluídos na Tabela 2 para preservar a clareza da apresentação. Esse padrão contrasta com o comportamento esperado para desfechos cardiovasculares em idosos, nos quais Schwartz (2001) demonstrou que o harvesting reduz artificialmente as estimativas de risco nos dias subsequentes à exposição, fenômeno que pode contribuir para os resultados nulos observados na análise geral dos desfechos cardiovasculares.

### **7.3 Desfechos cardiovasculares e respiratórios nulos na análise geral: interpretação**

A ausência de associação estatisticamente significativa para pneumonia, AVC e infarto na série completa é compatível com a hipótese de diluição do efeito por heterogeneidade sazonal da exposição e da resposta biológica. Schwartz (2001), em análise de PM10 em Chicago (1988-1993), demonstrou que PM10 se associou a aumento de 0,89% nas mortes diárias por 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mas que, após remoção do harvesting de curto prazo (15 a 60 dias), os efeitos sobre mortes e internações por DPOC mais que dobraram. Esse fenômeno sugere que análises de série completa subestimam o risco real em populações com alta prevalência de comorbidades cardiovasculares, particularmente quando o efeito se concentra em subperíodos específicos.

Machin et al. (2019), em Cuiabá (Mato Grosso), documentaram aumento de 25,6% nas internações respiratórias em idosos no lag 3 e 31,8% no lag 4 por incremento interquartil de 3,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM2,5, com estimativa de 188 internações adicionais e custo de aproximadamente US\$ 96 mil em um único ano. O contraste com os resultados nulos para idosos no presente estudo pode refletir diferenças no perfil de exposição entre os dois municípios, no nível basal de comorbidades e no poder estatístico disponível para desfechos com baixa frequência diária de eventos, limitação confirmada pela análise de poder post-hoc conduzida.

#### **7.4 Modificação de efeito por período sazonal e carga de queimadas**

No período chuvoso (novembro a abril), as estimativas estratificadas para idosos apresentaram maior magnitude nas internações por infarto (IRR = 1,285; IC 95%: 1,071-1,541) e por pneumonia (IRR = 1,273; IC 95%: 1,066-1,519), muito superiores às da série geral, sem que o teste formal de interação atingisse significância ( $p = 0,280$  e  $p = 0,469$ ). Esse padrão levanta a hipótese, a ser testada, de que o período chuvoso possa representar uma janela de vulnerabilidade cardiovascular e respiratória em idosos, não capturada pela análise centrada nos meses de queimadas. Ressalta-se que mesmo sob o critério mais liberal de  $p < 0,10$ , frequentemente adotado em análises de modificação de efeito, esses achados não atingiriam significância, permanecendo exploratórios.

O achado contraintuitivo de maior efeito cardiovascular no período chuvoso, quando as concentrações absolutas de PM2,5 são menores, pode ser explicado pela composição química diferencial do aerossol entre as estações. No período chuvoso, fontes urbanas como tráfego e ressuspensão contribuem com aerossóis ricos em metais de transição e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, compostos com reconhecida capacidade de gerar estresse oxidativo

vascular por unidade de massa. No período seco, o PM<sub>2,5</sub> de queimadas tem predomínio de carbono elementar e potássio, com possível menor toxicidade cardiovascular aguda por unidade de massa, hipótese que permanece especulativa na ausência de dados de especiação química para Porto Velho.

A ausência de modificação de efeito por alta carga de queimadas para asma em crianças (IRR = 0,970; IC 95%: 0,905-1,041; p de interação = 0,488) sugere que o efeito do PM<sub>2,5</sub> sobre as vias aéreas pediátricas opera de forma consistente ao longo do ano, independentemente do período de alta carga de queimadas mensurado pelos focos MODIS, achado que reforça a robustez da associação principal identificada na série geral.

### **7.5 Considerações metodológicas: fonte de exposição, modelagem e validade**

A opção pelo CAMS EAC4 como fonte exclusiva de PM<sub>2,5</sub> representa uma contribuição metodológica relevante para o contexto amazônico, onde a escassez de sensores de superfície com série contínua impede a cobertura de períodos longos por dados observacionais diretos. O CAMS EAC4 fornece estimativas horárias em resolução de 0,75° x 0,75° com cobertura global ininterrupta, tendo demonstrado desempenho satisfatório em regiões com intensa atividade de queimadas. Jang e Jung (2023) documentaram, para Porto Velho (2020 a 2022), padrão sazonal de PM<sub>2,5</sub> com picos no período seco a partir de estimativas independentes obtidas por sensores de baixo custo na própria cidade, consistente com o padrão observado na presente série via CAMS EAC4, conferindo suporte indireto à validade dos dados de reanálise para capturar a sazonalidade da exposição na cidade.

A limitação central da mensuração por pixel único de reanálise é a incapacidade de capturar a variabilidade espacial intramunicipal da exposição, especialmente relevante em um município de 34.090 km<sup>2</sup> com fontes heterogêneas de PM<sub>2,5</sub>. Esse tipo de erro de mensuração da exposição tende a ser não diferencial em relação ao desfecho, atenuando as estimativas de efeito em direção à nulidade, de modo que o efeito real do PM<sub>2,5</sub>, inclusive nos sinais exploratórios do período chuvoso, pode estar subestimado, e não superestimado, pelas análises apresentadas.

A adoção do GAM quasi-Poisson com DLNM permitiu estimar simultaneamente a dose-resposta e o atraso temporal do efeito do PM<sub>2,5</sub>, capturando a natureza dinâmica da resposta biológica que modelos de defasagem fixa não representam. O controle por tendência secular via splines naturais (7 df/ano), temperatura, umidade relativa (ERA5) e dia da semana minimizou a confusão residual sazonal. A estratificação por dois moderadores independentes

(sazonalidade e carga de queimadas), com teste formal de interação quasi-likelihood F-test, representa avanço em relação a estudos anteriores na Amazônia que não testaram modificação de efeito de forma sistemática.

### **7.6 Implicações para políticas de saúde e agenda de pesquisa**

A identificação de asma pediátrica como o desfecho mais sensível ao PM<sub>2,5</sub> na análise principal indica que sistemas de alerta antecipado em Porto Velho devem priorizar comunicações a cuidadores de crianças asmáticas e serviços de urgência pediátrica durante os meses de pico de queimadas (julho a outubro). O padrão exploratório de maior vulnerabilidade cardiorrespiratória em idosos no período chuvoso indica que o monitoramento da qualidade do ar e as ações de proteção à saúde devem ser mantidos ao longo de todo o ano, e não apenas no período de queimadas intensas.

Silveira et al. (2026) estimaram 5.472 mortes circulatórias e 2.621 mortes respiratórias atribuíveis ao PM<sub>2,5</sub> nas capitais amazônicas entre 2018 e 2023, evidenciando a magnitude do impacto sanitário que permanece sem resposta regulatória proporcional. Pesquisas futuras devem incorporar especiação química do PM<sub>2,5</sub> por período sazonal para testar a hipótese de toxicidade diferencial, ampliar a rede de sensores de superfície para estimar exposição com maior resolução espacial, e desenvolver estudos multicêntricos na Amazônia com desenho padronizado, contribuindo para a formulação de padrões regulatórios de qualidade do ar adaptados ao contexto pirogênico da região.

Os achados do presente estudo adicionam evidência epidemiológica local a um campo dominado por estimativas nacionais e regionais, demonstrando que o PM<sub>2,5</sub> exerce efeitos mensuráveis sobre a saúde cardiorrespiratória em Porto Velho mesmo em análise conservadora de série completa, e que a heterogeneidade sazonal da exposição e da vulnerabilidade populacional justifica a adoção de estratégias de vigilância diferenciadas por período do ano na Amazônia Ocidental.

### **7.7 Limitações do estudo**

O delineamento ecológico de série temporal impede o controle por características individuais como comorbidades, tabagismo, uso de medicamentos e nível socioeconômico. A exposição foi estimada por modelo de reanálise em pixel único, podendo não capturar a variabilidade espacial intramunicipal. A ausência de dados de especiação química do PM<sub>2,5</sub> por período sazonal impede a verificação direta da hipótese de toxicidade diferencial entre o aerossol de queimada e o aerossol urbano, que permanece como explicação plausível para os

padrões exploratórios observados, mas não pode ser confirmada com os dados disponíveis.

Para os achados exploratórios de modificação de efeito, a ausência de confirmação pelos testes formais de interação impede inferências causais sobre modificação de efeito nesses subgrupos. A estratificação por período sazonal e por carga de queimadas reduz o número de observações por subgrupo, diminuindo o poder estatístico para efeitos de menor magnitude. Os resultados são específicos para Porto Velho e sua generalização para outros municípios amazônicos deve ser feita com cautela, dado que o perfil de exposição, a composição do aerossol e as características demográficas variam substancialmente na região.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo estimou o efeito do PM<sub>2,5</sub> sobre desfechos cardiorrespiratórios em Porto Velho, Rondônia, em série temporal de 3.531 dias (2016-2025), testando a modificação desse efeito pela sazonalidade e pela carga de queimadas por meio de modelo DLNM com GAM quasi-Poisson. Os resultados confirmaram parcialmente as hipóteses do estudo e revelaram padrão de vulnerabilidade seletiva biologicamente coerente: o PM<sub>2,5</sub> exerceu efeito direto e mensurável sobre as internações por asma em crianças, enquanto entre os idosos foram identificados apenas sinais exploratórios de maior risco cardiorrespiratório no período chuvoso.

O achado principal foi a associação positiva e estatisticamente significativa entre PM<sub>2,5</sub> e internações por asma em crianças (IRR = 1,056; IC95%: 1,019–1,094 por 10 µg/m<sup>3</sup>, lag 0–7 dias), confirmada e amplificada na análise de sensibilidade com lag de 0 a 14 dias (IRR = 1,063; IC95%: 1,015–1,112), sem reversão do sinal que caracterizaria colheita prematura. A especificidade para asma pediátrica, e não para pneumonia ou outros desfechos respiratórios, indica mecanismo predominantemente irritativo-broncoespástico, mediado pela hiperresponsividade brônquica em crianças com maior dose inalada efetiva por unidade de superfície corporal. A hipótese H1 foi integralmente confirmada.

As análises de modificação de efeito não confirmaram modificação estatisticamente significativa do efeito do PM<sub>2,5</sub> por sazonalidade ou por carga de queimadas: nenhum teste formal de interação atingiu significância (menor  $p = 0,280$ ). Foram identificados, contudo, sinais exploratórios de maior magnitude no período chuvoso entre os idosos, nas internações por infarto (IRR = 1,285; IC 95%: 1,071-1,541) e por pneumonia (IRR = 1,273; IC 95%: 1,066-1,519), sem confirmação formal da interação. A hipótese H2 não foi confirmada; os sinais observados, embora com direção consistente com o previsto, permanecem como hipótese a ser testada em estudos com maior poder estatístico.

Os desfechos cardiovasculares e respiratórios em idosos não atingiram significância na análise da série completa, resultado interpretado como reflexo da heterogeneidade sazonal da exposição e do fenômeno de colheita prematura, e não como ausência de efeito biológico. A análise de poder post-hoc confirmou poder insuficiente para detectar IRRs de pequena magnitude em desfechos com baixa

frequência diária de eventos, reforçando a cautela na interpretação dos resultados nulos.

Do ponto de vista metodológico, este estudo constitui a série temporal diária de PM<sub>2,5</sub> com maior período de cobertura conduzida para um município da Amazônia Ocidental brasileira, integrando cinco fontes de dados sem valores ausentes. A adoção do CAMS EAC4 como fonte exclusiva de exposição, a estratificação simultânea por dois moderadores com teste formal de interação quasi-likelihood F-test, e a análise de múltiplos desfechos cardiorrespiratórios de internação em dois grupos etários de vulnerabilidade representam avanços em relação a estudos anteriores na região.

Do ponto de vista da saúde pública, a identificação de asma pediátrica como o desfecho mais sensível ao PM<sub>2,5</sub> indica que sistemas de alerta antecipado devem priorizar crianças asmáticas nos meses de pico de queimadas (julho a outubro). O padrão exploratório de maior vulnerabilidade cardiorrespiratória em idosos no período chuvoso indica que as ações de proteção à saúde ambiental devem transcender o período de queimadas e contemplar o monitoramento ao longo de todo o ano. Silveira et al. (2026) estimaram 5.472 mortes circulatórias e 2.621 mortes respiratórias atribuíveis ao PM<sub>2,5</sub> nas capitais amazônicas entre 2018 e 2023, evidenciando a magnitude do impacto sanitário que permanece sem resposta regulatória proporcional.

Os achados do presente estudo adicionam evidência epidemiológica local a um campo dominado por estimativas nacionais e regionais, demonstrando que o PM<sub>2,5</sub> exerce efeitos mensuráveis sobre a saúde cardiorrespiratória em Porto Velho mesmo em análise conservadora de série completa. A replicação deste desenho em outros municípios amazônicos, com incorporação de especiação química do PM<sub>2,5</sub> e ampliação da rede de sensores de superfície, representa a agenda mais promissora para fundamentar padrões regulatórios de qualidade do ar adaptados ao contexto pirogênico da Amazônia Ocidental.

## REFERÊNCIAS:

- ANDELA, N.; MORTON, D. C.; SCHROEDER, W.; CHEN, Y.; BRANDO, P. M.; RANDERSON, J. T. Tracking and classifying Amazon fire events in near real time. **Science Advances**, v. 8, n. 30, p. eabd2713, 29 jul. 2022. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd2713>
- ANDRUS, L. P.; WATERS, S. Enquadrando as chamas: analisando a cobertura jornalística dos incêndios na floresta amazônica de 2019 por jornais brasileiros e americanos. 2024. <https://doi.org/10.1590/scielopreprints.9414>
- ARBEX, M. A. et al. Poluição atmosférica e efeitos respiratórios, cardiovasculares e reprodutivos na saúde humana. **Revista Médica de Minas Gerais**, v. 22, n. 1, p. 43–56, 2012. Disponível em: <https://www.rmmg.org/artigo/detalhes/387>. Acesso em: maio 2026.
- ARTAXO, P. et al. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discussions**, v. 165, p. 203–235, 2013. <https://doi.org/10.1039/C3FD00052D>
- BAKER, R. E. et al. Epidemic dynamics of respiratory syncytial virus in current and future climates. **Nature Communications**, v. 10, p. 5512, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13562-y>
- BARKJOHN, K. K.; GANTT, B.; CLEMENTS, A. L. Development and application of a United States-wide correction for PM<sub>2.5</sub> data collected with the PurpleAir sensor. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 14, p. 4617–4637, 2021. <https://doi.org/10.5194/amt-14-4617-2021>
- BELL, M. L. et al. The temporal lag structure of short-term associations of fine particulate matter chemical constituents and cardiovascular and respiratory hospitalizations. **Environmental Health Perspectives**, v. 120, n. 8, p. 1094–1099, 2012. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104321>
- BERENGUER, E. et al. Políticas emergenciais não são suficientes para resolver crises de incêndio na Amazônia. **Communications Earth and Environment**, v. 13, 2024. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01344-4>
- BRASIL. Conselho Nacional de Saúde. **Resolução nº 510, de 7 de abril de 2016**. Dispõe sobre as normas aplicáveis a pesquisas em Ciências Humanas e Sociais. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 maio 2016.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 506, de 4 de julho de 2024**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2024.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Departamento de Informática do SUS. **Sistema de Informações Hospitalares do SUS (SIH/SUS)**. Brasília: DATASUS, 2024. Disponível em: <http://datasus.saude.gov.br>. Acesso em: maio 2026.
- BUTT, E. W. et al. Large air quality and human health impacts due to Amazon forest and vegetation fires. **Environmental Research Communications**, v. 2, n. 9, p. 095001, set. 2020. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/abb0db>
- CHEN, G. et al. Mortality risk attributable to wildfire-related PM<sub>2.5</sub> pollution: a global time

series study in 749 locations. **Lancet Planetary Health**, v. 5, n. 9, p. e579–e587, 2021. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00200-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00200-X)

COKER, E. S. et al. Association between PM<sub>2.5</sub> and respiratory hospitalization in Rio Branco, Brazil: demonstrating the potential of low-cost air quality sensor for epidemiologic research. *Environmental Research*, v. 214, p. 113738, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113738>

COSTA, E. J. M. D. A Amazônia, sustentabilidade e soberania: estabelecendo a arena para os debates durante a COP 30 em Belém. **Artigos do NAEA**, v. 1, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.18542/papersnaea.v1i1.16818>

COUTO, L. O. et al. Identifying high occurrence areas of hospitalization and mortality from respiratory diseases in the Brazilian Legal Amazon: a space-time analysis. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 40, 2024. <https://doi.org/10.1590/0102-311XEN148023>

CSILLIK, O. et al. Uma grande perda líquida de carbono atribuída a distúrbios antropogênicos e naturais no Arco de Desmatamento da Amazônia. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 121, n. 33, p. e2310157121, 2024. <https://doi.org/10.1073/pnas.2310157121>

CUNHA, A. C. et al. Caracterização temporal da precipitação pluvial do município de Porto Velho, Rondônia, no período de 1945 a 2003. **Scientia Naturae**, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/p7fmn6Y4spwt67Fxb6jrnnF/>. Acesso em: maio 2026.

CUSTODIO, J.; ABELEDO, H. Drone-based environmental emergency response in the Brazilian Amazon. **Drones**, v. 7, n. 9, p. 554, set. 2023. <https://doi.org/10.3390/drones7090554>

DEFLORIO-BARKER, S. et al. Cardiopulmonary effects of fine particulate matter exposure among older adults, during wildfire and non-wildfire periods, in the United States 2008-2010. *Environmental Health Perspectives*, v. 127, n. 3, p. 37006, 2019. <https://doi.org/10.1289/EHP3860>

DOMINICI, F. et al. On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health. *American Journal of Epidemiology*, v. 156, n. 3, p. 193-203, 2002. <https://doi.org/10.1093/aje/kwf062>

DUANE, A.; CASTELNOU, M.; BROTONS, L. Rumo a uma visão abrangente dos impulsionadores globais de novos eventos extremos de incêndios florestais. **Climatic Change**, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03066-4>

DUARTE, J. C. S.; HIGUCHI, M. I. G.; PINTO FRAXE, T. D. J. As percepções ambientais sobre as queimadas antropogênicas da floresta amazônica entre pós-graduandos em ciências ambientais da Universidade Federal do Amazonas. **Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 5, n. 2, p. 96–115, 2023. <https://doi.org/10.46551/rvg267523952023296115>

DUTRA, D. J. et al. Otimizando a preparação contra incêndios: uma análise prospectiva para

2030 na região de Boca do Acre, Amazônia brasileira. 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-5700>

ELEUTÉRIO, C. L. et al. Identificação de incêndios florestais com redes neurais convolucionais e sensoriamento remoto: aplicação à floresta amazônica. **International Journal of Remote Sensing**, 2024. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2425119>

FUNDO AMAZÔNIA. Relatório de atividades 2022-2023. Rio de Janeiro: BNDES, 2023. Disponível em: <https://www.fundoamazonia.gov.br>. Acesso em: maio 2026.

GASPARRINI, A.; ARMSTRONG, B.; KENWARD, M. G. Distributed lag non-linear models. *Statistics in Medicine*, v. 29, n. 21, p. 2224-2234, 2010. <https://doi.org/10.1002/sim.3940>

GONÇALVES, K. S.; CASTRO, H. A.; HACON, S. S. As queimadas na região amazônica e o adoecimento respiratório. **Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1523–1532, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1413-81232012000600016>

HEALTH EFFECTS INSTITUTE; IHME. State of Global Air 2025: a special report on global exposure to air pollution and its health effects. Boston: Health Effects Institute, 2025. Disponível em: <https://www.stateofglobalair.org>. Acesso em: maio 2026.

HOU, T.-Z. et al. O estresse oxidativo é o pivô para a lesão pulmonar causada por PM<sub>2,5</sub>. **Food and Chemical Toxicology**, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.114362>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br>. Acesso em: maio 2026.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TerraBrasilis**: plataforma de disseminação e análise de dados de monitoramento da cobertura e uso da terra e das queimadas na Amazônia. São José dos Campos: INPE, 2024. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br>. Acesso em: maio 2026.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: maio 2026.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Synthesis Report of the Sixth Assessment Report (AR6)**. 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em: out. 2024.

JAIN, S. et al. Community-acquired pneumonia requiring hospitalization among U.S. adults. **New England Journal of Medicine**, v. 373, n. 5, p. 415–427, 2015. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1500245>

JIANG, X. et al. Impact of Amazonian fires on atmospheric CO<sub>2</sub>. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 5, p. e2020GL091875, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020GL091875>

JIANG, X. Variações de sulfeto de carbonila durante as estações seca e úmida sobre a

- Amazônia. **Geophysical Research Letters**, v. 50, n. 5, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022gl101717>
- JONES, M. W. et al. State of wildfires 2023–2024. **Earth System Science Data**, v. 16, n. 8, p. 3601–3685, 2024. <https://doi.org/10.5194/essd-16-3601-2024>
- KANG, J.-Y. et al. PM<sub>2,5</sub> induz piroptose via ativação da via de sinalização ROS/NF- $\kappa$ B em células epiteliais brônquicas. **Medicina**, v. 60, n. 9, p. 1434, 2024. <https://doi.org/10.3390/medicina60091434>
- KOJIMA, G.; ILIFFE, S.; WALTERS, K. Frailty index as a predictor of mortality: a systematic review and meta-analysis. **Age and Ageing**, v. 47, n. 2, p. 193–200, 2018. <https://doi.org/10.1093/ageing/afx162>
- LI, S. et al. Wildland fire-related smoke PM<sub>2.5</sub> and cardiovascular disease emergency department visits in the western United States. **Journal of the American Heart Association**, v. 14, p. e040080, 2025. <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.040080>
- LIN, S. et al. PM<sub>2,5</sub> e seus componentes e encontros com a assistência médica de doenças respiratórias: aumento inesperado das relações de exposição-resposta nos últimos anos após políticas ambientais. **Environmental Pollution**, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124585>
- LIU, M.; MATSUI, H. Impacts of climate change on particulate matter. In: **Handbook of Air Quality and Climate Change**. Singapore: Springer, 2023. p. 1255–1272. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2760-9\\_39](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2760-9_39)
- MA, J. et al. Matéria particulada fina manipula uma resposta imune para exacerbar a patogênese microbiana no trato respiratório. **European Respiratory Review**, v. 173, p. 230259, 2024. <https://doi.org/10.1183/16000617.0259-2023>
- MACHIN, A. B. et al. Effects of exposure to fine particulate matter in elderly hospitalizations due to respiratory diseases in the south of the Brazilian Amazon. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, v. 52, p. e8130, 2019. <https://doi.org/10.1590/1414-431X20188130>
- MAGUIRE, N. et al. Influence of aging and immune alterations on susceptibility to pneumococcal pneumonia in the elderly. **Pathogens**, v. 14, n. 1, p. 41, 2025. <https://doi.org/10.3390/pathogens14010041>
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50–60, 1947.
- MAPBIOMAS BRASIL. **Área queimada no Brasil cresce 79% em 2024 e supera os 30 milhões de hectares**. 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2025/01/22/area-queimada-no-brasil-cresce-79-em-2024-e-supera-os-30-milhoes-de-hectares/>. Acesso em: jun. 2025.
- MARENGO, J. A. et al. Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 228, 2018. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>

MENDES, M. S. L. et al. Impactos das queimadas sobre a saúde da população humana na Amazônia maranhense. **Revista de Pesquisa em Saúde**, v. 17, n. 3, 2017. Disponível em: <http://www.periodicoeletronicos.ufma.br/index.php/revistahuufma/article/view/5400>. Acesso em: fev. 2025.

MOURA, F. E. A. et al. Respiratory syncytial virus seasonality in Brazil: implications for the immunisation policy for at-risk populations. **Epidemiology and Infection**, 2013. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4878298>. Acesso em: maio 2026.

MOURA, F. R. et al. Na linha de fogo: analisando os impactos das queimadas na poluição do ar e na qualidade do ar em uma cidade amazônica, Brasil. **Atmospheric Pollution Research**, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.102033>

NG, T. H. L. et al. Impacts of land use change and interannual climate variability on biomass burning emissions, air quality and public health in Amazon. **EGUsphere**, 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-5191>

NONGPHROMMA, N. A ligação entre a exposição a PM<sub>2,5</sub> e os riscos para a saúde cardiovascular. **International Journal of Science and Healthcare Research**, 2024. <https://doi.org/10.52403/ijshr.20240412>

NUNES, K. V. R.; IGNOTTI, E.; HACON, S. S. Circulatory disease mortality rates in the elderly and exposure to PM<sub>2.5</sub> generated by biomass burning in the Brazilian Amazon in 2005. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 29, p. 589–598, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2013000300010>

OLIVEIRA ALVES, N. et al. Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 10937, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11024-3>

OLIVEIRA, B. F. A. et al. Effects of exposure to fine particulate matter in elderly hospitalizations due to respiratory diseases in the South of the Brazilian Amazon. **Environmental Research**, 2019. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6345358>. Acesso em: maio 2026.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Classificação Estatística Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde: CID-10**. 10. ed. São Paulo: EDUSP, 1993.

RIBEIRO, J. et al. Predicting health impacts of wildfire smoke in Amazonas basin, Brazil. **Chemosphere**, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143588>

RIBEIRO, M. R. et al. Amazon wildfires and respiratory health: impacts during the forest fire season from 2009 to 2019. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 21, n. 6, p. 675, 2024. <https://doi.org/10.3390/ijerph21060675>

RODRIGUES, P. C. O.; IGNOTTI, E.; HACON, S. S. Distribuição espaço-temporal das queimadas e internações por doenças respiratórias em menores de cinco anos de idade em Rondônia, 2001 a 2010. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 22, n. 3, p. 455–464, 2013.

<https://doi.org/10.5123/S1679-49742013000300010>

RORATO, A. C. et al. Environmental threats over Amazonian Indigenous lands. **Land**, v. 10, n. 3, p. 267, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10030267>

SALAZAR, M. A. As reais emissões de carbono do Brasil associadas a florestas podem passar despercebidas pelo Acordo de Paris. **Mongabay Brasil**, 2 jul. 2018. Disponível em: <https://brasil.mongabay.com/2018/07/as-reais-emissoes-carbono-do-brasil-associadas-florestas-podem-passar-despercebidas-pelo-acordo-paris/>. Acesso em: jun. 2025.

SCHWARTZ, J. Is there harvesting in the association of airborne particles with daily deaths and hospital admissions? *Epidemiology*, v. 12, n. 1, p. 55–61, 2001. <https://doi.org/10.1097/00001648-200101000-00010>

SANDS, E. et al. Satellite-observed relationships between land cover, burned area, and atmospheric composition over the Southern Amazon. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 24, n. 19, p. 11081–11102, 2024. <https://doi.org/10.5194/acp-24-11081-2024>

SANTANA, M. M. M. et al. Modelo de aprendizado de máquina revela o papel do uso da terra e do clima nos incêndios florestais da Amazônia: cenários presentes e futuros. **Fire**, v. 7, n. 10, p. 338, 2024. <https://doi.org/10.3390/fire7100338>

SARAVIA, L. et al. Modelagem de regimes de incêndio na Amazônia em cenários de mudanças climáticas. **Oikos**, 2025. <https://doi.org/10.1111/oik.10764>

SILVEIRA, G. O. et al. Impact of PM<sub>2.5</sub> on cardiorespiratory mortality: a study in the capitals of Brazilian Amazon rainforest. *Toxicology*, v. 521, p. 154401, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2026.154401>

SEPÚLVEDA, A. Raízes históricas e caminhos futuros: centrando a justiça de desastres nos incêndios florestais da Amazônia brasileira. 2024. <https://doi.org/10.5204/book.eprints.252694>

SHI, T. et al. Uma associação entre componentes relacionados a PM<sub>2,5</sub> e doenças infecciosas respiratórias: um estudo baseado na China continental. **Acta Tropica**, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2024.107193>

SILVA, C. S. COP 30 em Belém: desafios e perspectivas para políticas climáticas na Amazônia e o papel do Brasil na governança ambiental global. v. 28, n. 139, p. 05–06, 2024. <https://doi.org/10.69849/revistaftr/ra10202410311705>

STATA CORP. **Stata Statistical Software**: release 15. College Station, TX: StataCorp LLC, 2017.

SZKLO, M.; NIETO, F. J. **Epidemiology: Beyond the Basics**. 2. ed. Sudbury: Jones and Bartlett, 2007.

TAMERIUS, J. D. et al. Environmental predictors of seasonal influenza epidemics across temperate and tropical climates. **PLOS Pathogens**, v. 9, n. 3, p. e1003194, 2013. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003194>

TOLEDO, N. et al. Dinâmica da seca meteorológica e hidrológica: o impacto das águas subterrâneas e dos eventos El Niño nos incêndios florestais na Amazônia. **Science of the Total Environment**, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176612>

URRUTIA-PEREIRA, M. et al. Impact of exposure to smoke from biomass burning in the Amazon rain forest on human health. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 47, n. 5, p. e20210219, 2021. <https://doi.org/10.36416/1806-3756/e20210219>

VALENTE, F.; LAURINI, M. A spatio-temporal analysis of fire occurrence patterns in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 12727, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39875-z>

VAN OLDENBORGH, G. J. et al. Caminhos e armadilhas na atribuição de eventos extremos. **Climatic Change**, v. 166, p. 13, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03071-7>

VIEHMANN, A. et al. Exposição residencial de longo prazo à poluição do ar urbano e medidas repetidas de marcadores sanguíneos sistêmicos de inflamação e coagulação. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 9, p. 656–663, 2015. <https://doi.org/10.1136/OEMED-2014-102800>

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO Global Air Quality Guidelines**: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>. Acesso em: maio 2026.

XU, R. et al. Impact of global short-term landscape fire sourced PM<sub>2.5</sub> exposure on child cause-specific morbidity: a study in multiple countries and territories. **Nature Communications**, v. 16, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64411-0>

XU, W. et al. Active fire dynamics in the Amazon: new perspectives from high-resolution satellite observations. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 20, p. e2021GL093789, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021GL093789>

JANG, Y.-W.; JUNG, G.-W. Temporal characteristics and sources of PM<sub>2.5</sub> in Porto Velho of Amazon region in Brazil from 2020 to 2022. **Sustainability**, v. 15, n. 18, p. 14012, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151814012><https://doi.org/10.3390/su151814012>

YANG, L. et al. Biomarcadores dos resultados de saúde associados à exposição a partículas ambientais. 2016. Disponível em: <https://eprints.qut.edu.au/102324/>. Acesso em: fev. 2025.

YE, T. et al. Risk and burden of hospital admissions associated with wildfire-related PM<sub>2.5</sub> in Brazil, 2000-15: a nationwide time-series study. **Lancet Planetary Health**, v. 5, n. 9, p. e599-e607, 2021. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00173-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00173-X)

YE, T. et al. Short-term exposure to wildfire-related PM<sub>2.5</sub> increases mortality risks and burdens in Brazil. **Nature Communications**, v. 13, p. 1–9, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29876-9>

ZAREBA, L. et al. A relação entre exposição a partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) e doenças do trato

respiratório superior. **Journal of Personalized Medicine**, v. 14, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.3390/jpm14010098>

ZHANG, R. et al. Caracterização de riscos e patogênese de doenças respiratórias causadas por PM2,5 atmosférico rural. **Science of the Total Environment**, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169878>

ZHANG, Y. et al. Respiratory risks from wildfire-specific PM2.5 across multiple countries and territories. **Nature Sustainability**, v. 8, n. 5, p. 474–484, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01533-9>