

A MÁ QUALIDADE DO AR NA REGIÃO CENTRO-NORTE DO BRASIL E SEU IMPACTO NA SAÚDE

IGOR NEVES DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de Mestre.

**CÁCERES
MATO GROSSO,
BRASIL 2022**

IGOR NEVES DE OLIVEIRA

**A MÁ QUALIDADE DO AR NA REGIÃO CENTRO-NORTE DO
BRASIL E SEU IMPACTO NA SAÚDE**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Eliane Ignotti

**CÁCERES
MATO GROSSO,
BRASIL 2022**

O48a	OLIVEIRA, Igor Neves de. A Má Qualidade do Ar na Região Centro-Norte do Brasil e Seu Impacto na Saúde / Igor Neves de Oliveira - Cáceres, 2022. 92 f.; 30 cm. (ilustrações) Il. color. (sim) Trabalho de Conclusão de Curso (Dissertação/Mestrado) - Curso de Pós-graduação Stricto Sensu (Mestrado Acadêmico) Ciências Ambientais, Faculdade de Ciências Agrárias e Biológicas, Câmpus de Cáceres, Universidade do Estado de Mato Grosso, 2022. Orientador: Eliane Ignotti 1. Queimadas. 2. Incêndios Florestais. 3. Material Particulado Fino. 4. Indicadores de Saúde. 5. Fração Atribuível. I. Igor Neves de Oliveira. II. A Má Qualidade do Ar na Região Centro- Norte do Brasil e Seu Impacto na Saúde: . CDU 502
------	--

IGOR NEVES DE OLIVEIRA

**A MÁ QUALIDADE DO AR NA REGIÃO CENTRO-NORTE DO
BRASIL E SEU IMPACTO NA SAÚDE**

Essa dissertação foi julgada e aprovada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Cáceres-MT, 20 de Abril de 2022

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ernandes Sobreira Oliveira Junior
Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)

Profa. Dra. Sandra de Souza Hacon
Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ)

Profa. Dra. Shaiana Vilella Hartwig
Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)



Profa. Dra. Eliane Ignotti
Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
(Orientadora)

**CÁCERES
MATO GROSSO,
BRASIL 2022**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha vó Benedita, que em abril de 2021 partiu devido a COVID-19.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir chegar ao final de mais essa etapa em minha vida.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos meus pais, Angela e Jonas, pelo apoio e suporte. Vocês são o meu alicerce.

Aos meus irmãos, Hugo e Udiane, pela motivação.

À professora Dra. Eliane Ignotti, pela orientação. A senhora sempre foi muito compreensiva. Obrigado pelos conhecimentos compartilhados e o carinho de sempre.

As minhas amigas do programa, Rithiely Silva, Karla Caroline e Natasha Rayane pelo companheiríssimo. Com vocês pude compartilhar os mais variados sentimentos que nos tomam conta durante uma Pós-graduação.

À professora (UNEMAT) Msc. Lubia Maieles Gomes Machado pela confecção dos mapas na análise de geoprocessamento. Muito obrigado pela ajuda, por dispor do seu tempo e por sua dedicação.

Aos professores Ismael Silveira (UFBA) e Beatriz de Oliveira (FIOCRUZ) pelos ensinamentos do programa R e também por suas contribuições nessa dissertação.

Aos Professores Ernandes Sobreira, Sandra Hacon e Shaina Hartwig, pelas considerações no processo de qualificação e defesa da dissertação.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e a UNEMAT pela oportunidade.

Muito obrigado a todos!

ÍNDICE

Lista de Siglas	9
Lista de Tabelas	11
Lista de Figuras	12
Resumo Geral	14
Abstract	16
1. Introdução Geral	18
2. Fundamentação Teórica	20
2.1 Diretrizes globais de qualidade do ar	20
2.2 Efeitos da exposição ao MP _{2,5} derivados de queimadas e incêndios florestais, sobre a saúde cardiopulmonar na região Centro-Norte do Brasil	22
2.3 Hospitalizações e Óbitos atribuíveis à exposição a partículas finas (MP _{2,5}) no Brasil	24
2.4 Justificativa.....	28
3. Objetivos	29
3.1 Geral	29
3.2 Específicos	29
Referências Bibliográficas	30
CAPÍTULO I: Poluição do ar por queimadas e incêndios florestais como risco ambiental para milhões de habitantes da Amazônia brasileira: indicador de exposição para a saúde humana	35
Resumo	36
Abstract	37
1. Introdução	38
2. Material e Métodos	39
2.1 Área de estudo	39
2.2. Coleta e processamento dos dados	40
2.2.1 Dados de qualidade do ar e focos de calor	40
2.2.2 Estimativas populacionais	41

2.2.3 Cálculo do indicador de exposição: percentual de dias com qualidade do ar inadequada para saúde humana	41
2.3 Análise espaço-temporal dos dados	42
3. Resultados	43
4. Discussão	54
4.1 Recomendações	60
5. Conclusão	60
Referências Bibliográficas	60
CAPÍTULO II: Morbimortalidade por doenças cardiopulmonares atribuível à poluição atmosférica por queimadas e incêndios florestais na Amazônia brasileira	66
Resumo	67
Abstract	68
1. Introdução	69
2. Material e Métodos	70
2.1 Local de estudo	70
2.2. Dados de morbimortalidade e poluição atmosférica	71
2.3 Análise estatística	72
2.3.1 Morbidade por doenças cardiopulmonares atribuíveis a exposição de curto prazo	72
2.3.1.1 Primeiro estágio: cálculo da função exposição-resposta por município	72
2.3.1.2 Segundo estágio: obtenção de uma curva exposição-resposta média para a região	74
2.3.1.3 Estimativa das internações atribuíveis à exposição ao MP _{2,5}	74
2.3.2 Mortalidade atribuível à exposição de longo prazo ao MP _{2,5}	75
3. Resultados	76
4. Discussão	80
4.1 Recomendações	83

5. Conclusão	84
Referências Bibliográficas	84
Considerações Finais	87
Anexos	91
Anexo 1 - Curvas de exposição-resposta para municípios Amazônicos	91

LISTA DE SIGLAS

AIC - Critérios de Informação de Akaike
ALRI - Doença respiratória inferior aguda
CAMS - *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CID-10 - 10ª Revisão da Classificação Internacional de Doenças
CO – Monóxido de Carbono
CO₂ – Dióxido de Carbono
DALYS - Anos de vida ajustados por incapacidade
DATASUS – Departamento de Informática do SUS
DNA – Ácido Desoxirribonucleico
ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*
EPA – *Environmental Protection Agency*
FA – Fração Atribuível
FIOCRUZ – Fundação Oswaldo Cruz
HC – Hidrocarbonetos
HPA – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
HRW – *Human Rights Watch*
IBGE – Instituto Brasileira de Geografia e Estatística
IC – Intervalo de Confiança
IDW - *Inverse of Distance Weighted*
IEPS – Instituto de Estudos para Políticas de Saúde
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia
IQAr - Índice de Qualidade do Ar
ISA - Instituto Socioambiental
MP - Material Particulado
MP_{2,5} – Material Particulado Fino
MP₁₀ – Material Particulado Grosso
MS – Ministério da Saúde

NO – Óxido Nítrico

NO₂ – Dióxido de Nitrogênio

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

O₃ – Ozônio

OMS – Organização Mundial da Saúde

PRODES - Projeto de Monitoramento do Desmatamento

PRONAR – Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar

RR – Risco Relativo

SIH – Sistema de Informações Hospitalares

SIM - Sistema de Informações sobre Mortalidade

SISAM - Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde

SUS – Sistema Único de Saúde

SO₂ – Dióxido de Enxofre

UFBA – Universidade Federal da Bahia

UNEMAT – Universidade do Estado de Mato Grosso

WHO – *World Health Organization*

WMO - *World Meteorological Organization*

µg/m³ - Microgramas por Metros Cúbicos

LISTA DE TABELAS

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Tabela 1 - Diretrizes globais de qualidade do ar da Organização Mundial da Saúde (OMS), 2021 21

Tabela 2 - Estudos nacionais de estimativas para internações e mortes atribuíveis à exposição ao $MP_{2,5}$ no Continente Sul-americano, no Brasil e na Amazônia, entre 2000 a 2019 27

CAPÍTULO I: Poluição do ar por queimadas e incêndios florestais como risco ambiental para milhões de habitantes da Amazônia brasileira: indicador de exposição para a saúde humana.

Tabela 1 - Dias (%) com concentrações de $MP_{2,5}$ acima de $15\mu g/m^3$ e estatística descritiva de médias diárias de $MP_{2,5}$ para as capitais e os municípios mais poluídos, localizados nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010 e 2019 49

CAPÍTULO II: Morbimortalidade por doenças cardiopulmonares atribuível à poluição atmosférica por queimadas e incêndios florestais na Amazônia brasileira.

Tabela 1 - Descrição do cálculo da fração de mortes por doenças cardiorrespiratórias e câncer de pulmão atribuíveis a exposição ao $MP_{2,5}$, entre os anos de 2010-2019 na região Amazônia brasileira 75

Tabela 2 – Densidade populacional dos municípios localizados na região do arco do desmatamento da região Amazônica brasileira: estimativas para população total e acima de 30 anos, no ano de 2020 76

Tabela 3 - Estatística descritiva das médias diárias de internação e mortalidade por doenças cardiorrespiratórias, mortalidade por câncer de pulmão, $MP_{2,5}$, temperatura e umidade específica do ar para municípios localizados na região do arco do desmatamento da região Amazônica brasileira, entre 2010-2019 78

Tabela 4 - Estimativas dos riscos relativos de internações por doenças cardiopulmonares a cada aumento de $10\text{ mg}/m^3$ de $MP_{2,5}$, e do número e fração das internações atribuíveis ao poluente na região Amazônica do Arco do Desmatamento, de 2010 a 2019 79

Tabela 5 - Estimativas das frações atribuíveis populacionais de mortes por doenças cardiopulmonares e câncer de pulmão à exposição ao $MP_{2,5}$ na região Amazônica (Arco do desmatamento), de 2010 a 2019 80

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I: Poluição do ar por queimadas e incêndios florestais como risco ambiental para milhões de habitantes da Amazônia brasileira: indicador de exposição para a saúde humana.

Figura 1 - Área de estudo: Região da Amazônia Legal e Centro-Oeste do Brasil 40

Figura 2 - Número anual de focos de calor nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010-2019 44

Figura 3 - Número mensal de focos de calor nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010-2019 45

Figura 4 - Percentual anual* de dias cujas concentrações de $MP_{2,5}$ excederam $15\mu g/m^3$ nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010-2019 46

Figura 5 - Percentual mensal* de dias cujas concentrações de $MP_{2,5}$ excederam $15\mu g/m^3$ nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010-2019 47

Figura 6 - Gráficos de distribuição dos percentuais de dias com concentrações de $MP_{2,5}$ acima de $15\mu g/m^3$ nas capitais (à esquerda) e municípios mais poluídos das regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010 e 2019. As figuras A e B são percentuais anuais*, com linha tracejada indicando o ponto de 25% (3 meses); C e D são percentuais de janeiro a março**, E e F são percentuais de agosto a outubro** 52

Figura 7 - Número absoluto e percentual da população da Amazônia brasileira* (A) e região Centro-Oeste** (B) exposta ao $MP_{2,5} > 15\mu g/m^3$ em 25% (3 meses) ou mais dos dias do ano, entre 2010-2019 53

CAPÍTULO II: Morbimortalidade por doenças cardiopulmonares atribuível à poluição atmosférica por queimadas e incêndios florestais na Amazônia brasileira.

Figura 1 - Área de estudo: região Amazônica e arco do desmatamento 71

ANEXOS

Figura Suplementar 1 - Curvas exposição-resposta específicas de cada município e combinadas. Onde o eixo Y corresponde aos Riscos Relativos (RR)

e as regiões acinzentadas seus respectivos intervalos de confiança, já o eixo X
corresponde aos níveis de exposição ao $MP_{2,5}$ 92

RESUMO GERAL

OLIVEIRA, Igor Neves de. **A má qualidade do ar na região Amazônica e Centro-Oeste do Brasil e seu impacto na saúde**. Cáceres: UNEMAT, 2022. 92 p. (Dissertação - Mestrado em Ciências Ambientais) ¹.

No Brasil, registros de queimadas e/ou incêndios florestais se intensificam ano após ano e municípios localizados nas partes central e norte apresentam as porções territoriais mais atingidas. Esses eventos emitem para a atmosfera partículas finas (MP_{2,5}) que se depositam no trato respiratório humano e são facilmente absorvidas pelo organismo, o que gera aumento no número de hospitalizações e mortes prematuras por doenças cardiopulmonares. Embora essa problemática ambiental da emissão de poluentes atmosféricos por queimadas e incêndios florestais seja similar àquela enfrentada por grandes centros urbanos, a atenção sobre os efeitos da exposição na saúde é mais direcionada para poluição urbana. Este trabalho objetiva através de dois capítulos, caracterizar a magnitude de exposição a má qualidade do ar decorrente da emissão de partículas finas (MP_{2,5}) por queimadas e incêndios florestais e quantificar o seu impacto na saúde cardiopulmonar da região Centro-Norte, entre os anos de 2010 e 2019. Para caracterizar a exposição a má qualidade do ar, no primeiro capítulo propomos, de acordo com o limite recomendado pela Organização Mundial de Saúde, a utilização de um indicador do tempo de exposição às concentrações inadequadas de MP_{2,5}, nas regiões Amazônica e Centro-Oeste. O indicador se trata do número percentual de dias cujas concentrações excederam o limite de 15µg/m³. Verificou-se que maiores extensões territoriais com os maiores percentuais anuais de dias com qualidade inadequada do ar ocorreram em 2015. Entre todo o período analisado, os meses de agosto a outubro apresentaram percentuais mensais mais elevados e alcançam maior extensão territorial. O estado do Amazonas e a região conhecida como arco do desmatamento concentraram os dez municípios com os piores percentuais em toda a década. O indicador proposto é reprodutível e evidencia o tempo de exposição a má qualidade do ar por períodos de no mínimo três meses por mais de 20 milhões de habitantes na área em estudo. No segundo capítulo, para quantificar o impacto da exposição, estimamos o número e frações de hospitalizações e óbitos por doenças cardiopulmonares atribuíveis ao MP_{2,5}, em sete municípios localizados na região Amazônica, sendo seis do arco do desmatamento. Atribuiu-se à exposição 1348 internações (1,1%) e 3642 (12%) óbitos, ambos por doenças cardiopulmonares e 321 (17%) óbitos por câncer de pulmão na década de 2010 a 2019. Porto Velho-RO teve as maiores frações atribuíveis para os três desfechos selecionados. Devido a elevadas concentrações de MP_{2,5} provenientes de queimadas e incêndios florestais, municípios da região Amazônica possuem maiores estimativas de frações atribuíveis para desfechos de hospitalizações e óbitos por doenças cardíacas e pulmonares, comparadas as cidades da região sudeste. Nossos resultados demonstram que a exposição aos poluentes emitidos por queimadas e incêndios florestais na região Centro-Norte do Brasil geram prejuízos à saúde humana.

Recomenda-se aos gestores de saúde e meio ambiente a priorização de esforços políticos para reduzir os longos períodos as concentrações e o tempo de exposição à má qualidade do ar, como medidas de proteção à saúde dos mais de 40 milhões de habitantes da Amazônia e Centro-Oeste do Brasil.

Palavras-chave: queimadas, incêndios florestais, material particulado fino, indicadores de saúde, fração atribuível.

¹ Orientadora: Eliane Ignotti, UNEMAT

ABSTRACT

OLIVEIRA, Igor Neves de. **Poor air quality in the Amazon region and Midwest of Brazil and its impact on health**. Cáceres: UNEMAT, 2022. 92 p. (Dissertation - Master in Environmental Sciences) ¹.

In Brazil, fires and/or forest fires intensify year after year and municipalities located in the central and northern parts have the most affected territorial portions. These events emit fine particles ($PM_{2.5}$) into the atmosphere that are deposited in the human respiratory tract and are easily absorbed by the body, which leads to an increase in the number of hospitalizations and premature deaths from cardiopulmonary diseases. Although this environmental problem of the emission of atmospheric pollutants by forest fires and fires is similar to that faced by large urban centers, attention on the effects of exposure on health is more directed to urban pollution. This study aims, through two chapters, to characterize the magnitude of exposure to poor air quality resulting from the emission of fine particles ($PM_{2.5}$) by forest fires and fires and to quantify its impact on cardiopulmonary health in the Center-North region, among years 2010 and 2019. In order to characterize exposure to poor air quality, in the first chapter we propose, according to the limit recommended by the World Health Organization, the use of an indicator of exposure time to inadequate concentrations of $PM_{2.5}$, in the Amazon and Midwest regions. The indicator is the percentage number of days whose concentrations exceeded the limit of $15\mu g/m^3$. It was found that the largest territorial extensions with the highest annual percentages of days with inadequate air quality occurred in 2015. Among the entire analyzed period, the months from August to October had higher monthly percentages and reached greater territorial extension. The state of Amazonas and the region known as the arc of deforestation concentrated the ten municipalities with the worst percentages in the entire decade. The proposed indicator is reproducible and shows the time of exposure to poor air quality for periods of at least three months for more than 20 million inhabitants in the area under study. In the second chapter, to quantify the impact of exposure, we estimated the number and fractions of hospitalizations and deaths from cardiopulmonary diseases attributable to $PM_{2.5}$, in seven municipalities located in the Amazon region, six of which are in the arc of deforestation. 1348 hospitalizations (1.1%) and 3642 (12%) deaths were attributed to exposure, both due to cardiopulmonary diseases and 321 (17%) deaths from lung cancer in the decade from 2010 to 2019. Porto Velho-RO had the highest attributable fractions for the three selected outcomes. Due to high concentrations of $PM_{2.5}$ from forest fires and fires, municipalities in the Amazon region have higher estimates of attributable fractions for outcomes of hospitalizations and deaths from heart and lung diseases, compared to cities in the Southeast region. Our results demonstrate that exposure to pollutants emitted by wildfires and forest fires in the Center North region of Brazil causes harm to human health. Health and environment managers are recommended to prioritize political efforts to reduce long-term concentrations and exposure time to poor air

quality, as measures to protect the health of the more than 40 million inhabitants of the Amazon and Midwest of Brazil.

Keywords: fires, forest fires, fine particle, health indicators, attributable fraction.

¹ Major Professor: Eliane Ignotti, UNEMAT

1. INTRODUÇÃO GERAL

A ocorrência de queimadas e/ou incêndios florestais se intensifica ano após ano em toda a América do Sul. No entanto, mais de 60% do total de focos de calor registrados entre 1998 e 2018 ocorreram no Brasil (OLIVEIRA-JÚNIOR *et al.*, 2021). Os municípios localizados nas partes central e norte, de forma mais específica para aqueles que compõem os biomas da Amazônia, Cerrado e Pantanal, apresentam as porções territoriais mais atingidas (MAPBIOMAS, 2021; OLIVEIRA-JÚNIOR *et al.*, 2021).

A maior ocorrência desses eventos nessas regiões é resultado da combinação entre as atividades antrópicas precedidas de desmatamento e de fatores climáticos extremos trazidos pela estação seca, como temperaturas elevadas e a baixa pluviosidade e umidade do ar (SILVÉRIO *et al.*, 2019; ALENCAR; RODRIGUES, CASTRO, 2020; OLIVEIRA-JÚNIOR *et al.*, 2020). Mesmo em anos considerados de baixo risco para ocorrência de fogo, cujos períodos de baixa precipitação e temperaturas altas são menos intensos, a Amazônia apresenta vulnerabilidade a registros elevados de focos de calor (BARBOSA *et al.*, 2021).

Na região Amazônica há três tipos de fogo: o fogo de desmatamento recente; o fogo para o reaproveitamento de pastagens e áreas agrícolas; e o fogo que invade florestas ou áreas de vegetação nativa. Os dois primeiros são conhecidos como “queimadas” e são de origem intencional, já o último, conhecido como “incêndios florestais”, é geralmente de origem accidental por meio do escape de chamas de manejos de áreas agrícolas, embora também possa iniciar de maneira intencional (fogo ilegal/criminoso) (BARLOW *et al.*, 2019).

Em particular para a Amazônia Legal, a estação seca varia entre três a cinco meses do ano e os picos de queimadas e incêndios florestais, geralmente se concentraram entre os últimos dois meses desta estação e o primeiro mês seguinte da estação chuvosa (CARVALHO *et al.*, 2021). Nos últimos anos o governo federal vem adotando um período “proibitivo do fogo”, que por meio de decreto oficial, suspende a permissão de seu uso em práticas agropastoris e

florestais na Amazônia e Pantanal por 120 dias, entre julho e outubro, época de estiagem (BRASIL, 2020,2021).

Queimadas e incêndios florestais emitem para a atmosfera compostos gasosos e aerossóis que são facilmente transportados pela ação do vento, alcançando longas distâncias da sua fonte de emissão (FREITAS *et al.*, 2005) e sujeitando populações à longos e consecutivos dias a exposição a qualidade do ar inadequada (MASCARENHAS *et al.*, 2008). De modo geral, são compostos como: dióxido e monóxido de carbono (CO₂, CO), óxidos de nitrogênio (NO_x - NO e NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), ozônio (O₃), hidrocarbonetos (HC), aldeídos e material particulado (MP) (CANÇADO *et al.*, 2006; COLOMBINI, 2008).

O material particulado é uma mistura de partículas líquidas e sólidas suspensas no ar, de tamanho e composição química variada. De acordo com o seu diâmetro aerodinâmico pode ser classificada como: grossa (2,5 a 10µm: MP₁₀) e fina (inferior a 2,5µm: MP_{2,5}) (EPA, 2021). Partículas finas (MP_{2,5}) são mais facilmente depositadas no trato respiratório e absorvidas pelo nosso organismo, causando danos como: estresse oxidativo, disfunção endotelial, resposta inflamatória pulmonar e até mesmo sistêmica, porque a partir das vias aéreas inferiores (alvéolos pulmonares) as lesões podem ganhar as correntes sanguíneas (MILLER; SHAW; LANGRISH, 2012; SANDOVAL; REYES; OYARZÚN, 2019).

Mais de 80% das concentrações de partículas finas (MP_{2,5}) emitidas nos períodos de seca na Amazônia são derivadas de queimadas e incêndios florestais (BUTT *et al.*, 2020). Por isso, diferentemente dos centros urbanos, onde a exposição a esse poluente se caracteriza por concentrações mais estáveis o ano todo, na região Amazônica se observa um processo agudo por cerca de três meses, onde há detecção de médias diárias extremamente mais elevadas (BUTT *et al.*, 2020; HRW; IEPS; IPAM, 2020) e prejudiciais para a saúde humana (WHO, 2021).

Os danos à saúde gerados por partículas finas emitidas nessas regiões, terminam por repercutir no aumento do número de atendimentos de emergência, admissões hospitalares e mortes prematuras, devidos sua relação com as

maiores incidências de agravos cardíacos e pulmonares (CARMO *et al.*, 2010; IGNOTTI *et al.*, 2010a; NUNES; IGNOTTI; HACON, 2013; SANT'ANNA; ROCHA, 2020; YE *et al.*, 2021).

Diante dessa problemática ambiental enfrentada pela região Centro-Norte, sobretudo pela Amazônia, este trabalho objetiva através de dois capítulos, caracterizar a magnitude de exposição a má qualidade do ar decorrente da emissão de partículas finas ($MP_{2,5}$) por queimadas e incêndios florestais e quantificar o seu impacto na saúde cardiopulmonar da região Centro-Norte, entre 2010-2019.

A região Centro-Norte sofre com um longo período de estiagem e que coincide com os maiores registros de queimadas e incêndios florestais, os quais emitem e dispersam partículas finas ($MP_{2,5}$) em concentrações extremamente inadequadas a saúde. Por isso, as principais hipóteses levantadas para o trabalho são de que no período de estudo, populações foram submetidas a longos períodos de má qualidade do ar, que resultaram em excesso de hospitalizações e óbitos cardiorrespiratórios na Amazônia Legal e no Centro-Oeste do Brasil.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Diretrizes globais de qualidade do ar

De acordo com a OMS, estima-se que no mundo a cada ano a exposição à poluentes do ar causem a perda de milhões de anos de vida saudáveis e também de mortes prematuras (WHO, 2016). Por isso, recentemente e depois de mais de 15 anos a OMS atualizou suas diretrizes globais de qualidade do ar, com recomendações que apresentam limites bem inferiores aqueles apresentados nas diretrizes publicadas em 2005 (WHO, 2021). Na tabela 01 são apresentados os padrões atualizados em setembro de 2021 para os seis poluentes que possuem as maiores evidências de que sua exposição causa efeitos adversos à saúde, sendo: partículas grossas (ou inaláveis - MP_{10}) e finas

(MP_{2,5}), ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e monóxido de carbono (CO).

Tabela 1 - Diretrizes globais de qualidade do ar da Organização Mundial da Saúde (OMS), 2021.

Poluente	Tempo médio	Metas intermediárias (níveis provisórios)				Nível recomendado (AQG level)
		1	2	3	4	
MP _{2,5} µg/m ³	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas	75	50	37,5	25	15
MP ₁₀ µg/m ³	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas	150	100	75	50	45
O ₃ µg/m ³	Temporada de pico*	100	70	----	----	60
	8 horas	160	120	----	----	100
NO ₂ µg/m ³	Anual	40	30	20	----	10
	24 horas	120	50	----	----	25
SO ₂ µg/m ³	24 horas	125	50	----	----	40
CO mg/m ³	24 horas	7	----	----	----	4

* Média da concentração diária máxima de O₃ de 8 horas nos seis meses consecutivos com a maior concentração média. Fonte: WHO (2021).

De acordo com a IQAir (2021), empresa suíça de tecnologia de qualidade do ar, os trabalhos da OMS para atualizar as diretrizes globais de qualidade do ar em 2021, começaram em 2016. Os organizadores da OMS formaram uma equipe global de especialistas em assuntos multidisciplinares ligados à poluição do ar e seus efeitos na saúde, que juntos revisaram informações científicas sobre a exposição a componentes específicos da poluição do ar interno e externo e efeitos adversos à saúde. Por meio da compilação e avaliação destas informações, as novas diretrizes recomendadas foram determinadas como o limite de concentração do poluente acima do qual

há um potencial aumentado de efeitos adversos à saúde, independente do microambiente.

O poluente $MP_{2,5}$ é comumente aceito como o mais prejudicial à saúde humana, pois pode prevalecer no meio ambiente por muito tempo e gerar uma ampla gama de efeitos adversos na saúde. As novas diretrizes reduziram pela metade as concentrações médias de $MP_{2,5}$ recomendadas como aceitáveis a saúde humana, passando de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na média anual e de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na média diária (WHO, 2021).

De acordo com o relatório produzido pela IQAir (2021), embora no Brasil a concentração anual média de $MP_{2,5}$ tenha caído de $14,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 2020 para $13,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 2021, ainda ultrapassa em até duas a três vezes o limite anual de concentração preconizado de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. O IQAir destaca que entre os vários desafios enfrentados pelo país para se alcançar os limites seguros, estão as emissões de partículas por queimadas e incêndios florestais aliadas a prática do desmatamento. Na Amazônia, nos meses cuja estiagem e a ocorrência de queimadas e incêndios florestais atingem o seu pico, as concentrações médias diárias chegam a ultrapassar em até duas a cinco vezes ($50\text{-}130 \mu\text{g}/\text{m}^3$) o limiar diário recomendado pela OMS em 2005 ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e ultrapassam em até três a oito vezes o limite preconizado atualmente ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (HRW; IEPS; IPAM, 2020).

2.2 Efeitos da exposição ao $MP_{2,5}$ derivados de queimadas e incêndios florestais, sobre a saúde cardiopulmonar na região Centro-Norte do Brasil

Um risco aumentado de morbidades cardiorrespiratórias para a exposição ao $MP_{2,5}$ nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, e que ultrapassa limites recomendados como aceitáveis pela OMS são advertidos pela literatura científica (CARMO *et al.*, 2009; 2010; IGNOTTI *et al.*, 2010a; 2010b; CARMO; ALVES; HACON, 2013; SILVA *et al.*, 2013; MACHIN; NASCIMENTO, 2018; MACHIN *et al.*, 2019; MENEZES; PAVANITTO; NASCIMENTO, 2019; YE *et al.*, 2021). De acordo com Ye *et al.* (2021) as concentrações de $MP_{2,5}$ aumentam do sentido leste para o oeste brasileiro, por isso as regiões Norte e Centro-Oeste apresentam as maiores médias diárias de exposição.

Em Rio Branco-AC, o elevado acúmulo de fumaça sobre a capital registrada na estiagem de 2005, decorrente das intensas queimadas, fez exceder o limite de qualidade do ar em mais de 20 dias, acarretando a notificação de um surto por doenças respiratórias e uma correlação positiva entre a exposição ao $MP_{2,5}$ e os atendimentos por asma (MASCARENHAS *et al.*, 2008).

Ignotti *et al.* (2010b) realizaram um estudo do impacto de partículas finas sobre a saúde humana, no qual utilizaram um indicador baseado no percentual de horas anuais (AH%) de exposição a concentrações acima de $80\mu g/m^3$. Foram analisadas todas as microrregiões dos estados da região Amazônica, onde as internações nas faixas mais vulneráveis apresentaram as maiores associações. Para cada aumento de 1% no indicador, houve uma adição de 10% nas taxas de internações entre idosos e de 8% nas internações de crianças. O mesmo indicador, a época para concentrações acima de $25\mu g/m^3$ foi associado a taxas de mortalidade por doenças do aparelho circulatório em idosos (≥ 65 anos) das mesmas microrregiões da Amazônia (NUNES; IGNOTTI; HACON, 2013).

Em Alta Floresta-MT foram verificados que um incremento de $10\mu g/m^3$ nas concentrações de $MP_{2,5}$ se associou a aumentos significativos de 2,95 e 3,2% no número de admissões hospitalares em idosos, no sexto e quinto dia posteriores a exposição. Já em crianças foi encontrado adições em 2,9 e 2,6% para atendimentos ambulatoriais no sexto e sétimo dia (CARMO *et al.*, 2009; 2010). Ignotti *et al.* (2010a), para o mesmo incremento, também encontraram aumentos percentuais significativos no risco relativo (%RR) de hospitalização: para crianças 6% no terceiro dia (*lag*3, IC95%: 1,4-10,8) e 5,1% no quarto (*lag*4, IC95%: 0,6-9,8); e para idosos 6,8% no dia da exposição (*lag*0, IC95%: 0,5-13,5).

Em Cuiabá-MT, três estudos mostraram associação significativa da exposição sobre doenças respiratórias em crianças: Silva *et al.* (2013) atribuíram adições de 11,4, 21,6 e 22% nas hospitalizações a cada $10\mu g/m^3$ nas concentrações de $MP_{2,5}$ para as médias móveis do primeiro, quinto e sexto dia, respectivamente; Machin e Nascimento (2018), para a elevação de $5\mu g/m^3$, encontraram riscos significativos no segundo (*lag*2, RR = 1,06 - IC95%: 1,03-1,10) e terceiro dia (*lag*3, RR = 1,04 - IC95%: 1,00-1,08) posteriores ao dia de exposição; e para o mesmo acréscimo, Menezes, Pavanitto e Nascimento

(2019), estimaram risco relativo (RR) de até 1,04 no primeiro, segundo e sexto dia de atraso, com aumento percentual de até 18% nas internações em meninas de até 10 anos.

Ainda para Cuiabá-MT, Machin *et al.* (2019) verificaram que a exposição a concentrações acima de $3,5\mu\text{g}/\text{m}^3$, estiveram associadas significativamente com internações em idosos (≥ 60 anos) no terceiro (*lag*3, RR = 1,09) e quarto dia (*lag*4, RR = 1,12) após exposição inicial ao poluente $\text{MP}_{2,5}$.

Investigações clínicas dos efeitos do $\text{MP}_{2,5}$ na função pulmonar de escolares (6-15 anos) em dois municípios do centro-sul da Amazônia brasileira, encontraram picos de fluxo expiratório (PFE) reduzidos no período das queimadas. Para o aumento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ nas concentrações de partículas finas, houve redução no fluxo de ar entre 0,26 a 0,38 l/min (IC95%) em Alta Floresta-MT e de 0,46 a 0,54 l/min (IC:95%) em Tangará da Serra-MT (JACOBSON *et al.*, 2012, 2014).

2.3 Hospitalizações e Óbitos atribuíveis à exposição a partículas finas ($\text{MP}_{2,5}$) no Brasil

Atualmente, alguns estudos apresentam estimativas do percentual de hospitalizações e óbitos atribuíveis exclusivamente aos fatores de risco originados por problemas ambientais, com destaque para o poluente atmosférico $\text{MP}_{2,5}$. Tais estudos utilizam como base a produção da Fração Atribuível (FA), indicador que oferece com grau aceito de erros o número de hospitalizações e mortes cuja exposição foi o fenômeno responsável. Assim, também informa a proporção do desfecho que podemos eliminar ao se atenuar o fator de exposição. Com isso, o indicador pode fornecer elementos importantes para planejamentos e ações de prevenção e controle de doenças e mortes no país (CAMEY *et al.*, 2010; REZENDE; ELUF-NETO, 2016).

A OMS é uma das entidades que faz o uso da Fração Atribuível (FA) para estimar periodicamente a “Carga Ambiental Global de Doenças” utilizando como indicador “anos de vida ajustados por incapacidade (DALYS)” atribuíveis à poluição atmosférica derivada de partículas finas ($\text{MP}_{2,5}$) (WHO, 2016). O seu

relatório para o ano de 2012, demonstrou que o Brasil se destacou como uma das nações que apresentaram um dos maiores números de DALYs por morbidades gerais, atribuíveis à exposição ao MP_{2,5}. Também, foi atribuído para o território nacional, um excesso de 18.982 mil DALYs por doença respiratória inferior aguda (ALRI) em menores de 5 anos e a cada 100 mil crianças, 372 DALYs. Em todo o mundo, as ALRI em crianças representaram 17% das DALYs atribuíveis dentre todas as doenças analisadas. Em relação a mortalidade atribuível ao MP_{2,5}, a OMS apontou que mais de 90% das mortes atribuíveis no mundo são devido a doenças não transmissíveis em adultos, como doenças cardiovasculares, doenças pulmonares e cânceres (WHO, 2016).

Na tabela 02, são apresentados com maior detalhamento os principais achados dos estudos nacionais que atribuíram internações e mortes por doenças cardiorrespiratórias à exposição ao MP_{2,5}, incluindo o custo excedente de hospitalizações.

Um estudo sobre o impacto do MP_{2,5} derivado exclusivamente de queimadas e incêndios florestais sobre internações totais entre 2000 e 2015, foi realizado em municípios brasileiros com densidades populacionais acima de 100 mil habitantes, onde foi verificado que o maior número de hospitalização atribuível ocorreu em cidades da região Sudeste, com 321.455 internações. No entanto, as maiores frações atribuíveis ocorreram nas regiões Centro-Oeste (1,04%), Sul (0,86%) e Norte (0,70%). As regiões Sudeste e Nordeste apresentaram frações de 0,53% e 0,12%, respectivamente. Para todo o conjunto de municípios foi atribuído mais de 700 mil internações, o que representou uma fração atribuível em todo o Brasil de 0,53%. Das internações atribuíveis, mais de 350 mil foram por problemas cardíacos e pulmonares (YE *et al.*, 2021). Durante a temporada de incêndios em 2019, Nawaz e Henze (2020) atribuíram ao MP_{2,5}, 4.966 (IC95%: 2.427-8.340) mortes prematuras por doenças cardiopulmonares e que representaram 10% de todas as mortes prematuras para esse desfecho em todo o Brasil.

Em Volta Redonda-RJ, a elevação de 5µg/m³ nas concentrações de MP_{2,5}, resultou em 76 internações por 4 tipos de doenças respiratórias entre todas as idades, o que representou um excesso de R\$ 84 mil aos gastos do

município em 2012 (NASCIMENTO *et al.*, 2016). Em Taubaté-SP, para o mesmo acréscimo na exposição, foram atribuídas 38 internações por pneumonia e asma em crianças entre 2011 e 2012, o que gerou uma adição de R\$ 84 mil no custo hospitalar (CÉZAR *et al.*, 2016). Em São José do Rio Preto – SP, $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ a mais nas concentrações de $\text{MP}_{2,5}$ adicionaram 256 hospitalizações pediátricas apenas por pneumonia e um dispêndio na ordem de R\$ 220 mil entre os anos de 2011 e 2013 (PATTO *et al.*, 2016), e 650 internações por doenças cardiovasculares com custo em torno de R\$ 1.9 milhão entre 2011 e 2012 (MANTOVANI *et al.*, 2016).

Rodrigues *et al.* (2015) tomando como base o ano de 2011, realizaram uma projeção das mortes e internações por doenças respiratórias na rede pública de saúde atribuíveis à poluição por $\text{MP}_{2,5}$ no Estado de São Paulo, entre 2012 e 2030, bem como os seus custos. Aos idosos seriam atribuídas 430.365 mil internações e a crianças 138.050 mil até 2030, o que representaria gastos na ordem de R\$ 422.558.075 milhões e R\$ 134.046.950 milhões, respectivamente. Avaliando um cenário com um aumento de 5% nas concentrações de $\text{MP}_{2,5}$, esses números chegariam em 446.064 mil casos (R\$ 437.957.716 milhões) e 142.434 mil (R\$ 138.303.854 milhões), respectivamente.

Em Cuiabá, município amazônico, a elevação de $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ nas concentrações de $\text{MP}_{2,5}$, implicaram em aumentos de 89 internações por diversos problemas respiratórios em crianças e um custo de R\$ 95 mil no ano de 2012 (MACHIN; NASCIMENTO, 2018). Entre 2012 e 2013, para os mesmos parâmetros de exposição Menezes, Pavanitto e Nascimento (2019), identificaram um excesso de 95 hospitalizações por 6 tipos de patologias respiratórias em meninas menores de 10 anos e gastos na ordem de R\$ 105 mil. Também para o ano de 2012, Machin *et al.*, (2019), atribuíram 188 internações por diferentes morbidades respiratórias em idosos a uma elevação de $3,5\mu\text{g}/\text{m}^3$ nos níveis de $\text{MP}_{2,5}$, gerando gastos excedentes ao governo local na ordem de R\$ 96 mil. Em um trabalho produzido apenas para municípios do bioma Amazônico foram atribuídos ao $\text{MP}_{2,5}$, 2.195 hospitalizações por doenças respiratórias no ano de 2019, com um excesso de custo ao SUS entre 1.88 a 5.64 milhões de reais (SANT'ANA; ROCHA, 2020).

Tabela 2 - Estudos nacionais de estimativas para internações e mortes atribuíveis à exposição ao MP_{2,5} no Continente Sul-americano, no Brasil e na Amazônia, entre 2000 e 2019.

Referência	Morbidades	Faixa etária	Tipo de desfecho	NA*	Excesso de custo	NT**	Ano	Local
Nawaz e Henze (2020)	Doença isquêmica do coração, AVC, DPOC, câncer de pulmão e doença respiratória inferior aguda	Todas	Mortes	4.966	—	—	2019	Brasil
Butt et al. (2020)	Doenças não transmissíveis e infecções respiratórias nas vias inferiores	Todas	Mortes	9.770	-----	-----	2012	Brasil
Ye et al. (2021)	Todas	Todas	Internações	766.091	—	—	2000-2015	Brasil
Reddington et al. (2015)	Doenças Respiratórias e câncer de Pulmão	Todas	Mortes	2.906	-----	----	2002-2012	América do Sul
Butt et al. (2020)	Doenças não transmissíveis e infecções respiratórias nas vias inferiores	Todas	Mortes	16.800	-----	----	2012	América do Sul
Nascimento et al., (2016)	Pneumonia; bronquite e bronqueolite; asma	Todas	Internações	76	R\$ 84 mil	752	2012	Volta Redonda-RJ
Cézar et al., (2016)	Pneumonia e asma	Crianças (≤ 10)	Internações	38	R\$ 84 mil	140	Ago-2011/ Jul-2012	Taubaté-SP
Patto et al., (2016)	Pneumonia	Crianças (< 10)	Internações	256	R\$ 220 mil	1.161	Out-2011/ Set-2013	São José do Rio Preto-SP
Mantovani et al., (2016)	Doenças Cardiovasculares	Todas	Internações	650	R\$ 1.9 milhão	4.505	Out-2011/ Set-2012	São José do Rio Preto-SP
Machin e Nascimento (2018)	Traqueíte; laringite; pneumonias; bronquite e bronqueolite; asma	Crianças (≤ 10)	Internações	89	R\$ 95 mil	565	2012	Cuiabá-MT
Machin et al., (2019)	Pneumonia; bronquite e bronquiolite; DPOC; asma	Idosos (≥ 60)	Internações	188	R\$ 96 mil	591	2012	Cuiabá-MT
Menezes, Pavanitto e Nascimento (2019)	Traqueíte e laringite; pneumonias; bronquite e bronqueolite; asma	Crianças do sexo feminino (< 10)	Internações	95	R\$ 105 mil	525	2012-2013	Cuiabá-MT

Butt <i>et al.</i> (2020)	Doenças não transmissíveis e infecções respiratórias nas vias inferiores	Todas	Mortes	4.300	-----	----	2012	Municípios da Bacia Amazônica
Butt <i>et al.</i> (2021)	Doenças não transmissíveis e infecções respiratórias nas vias inferiores	Todas	Mortes	3.400	-----	----	2019	Municípios da Bacia Amazônica
Sant'ana e Rocha (2020)	Doenças Respiratórias	Todas	Internações	2.195	R\$ 1.88 a 5.64 milhões	----	2019	Municípios do Bioma Amazônia

NA* = Números Atribuíveis; NT** = Números Totais

Butt *et al.* (2021) estimaram que a prevenção da exposição a partículas finas derivadas de queimadas e incêndios florestais na Bacia Amazônica no ano de 2012, teria evitado 16.800 (IC95%: 16.300-17.400) mortes prematuras por doenças não transmissíveis e infecções respiratórias nas vias inferiores em toda a América do Sul, com 26% de redução só na Bacia Amazônica (4.300 (IC95%: 4.100–4.500)). Em nível nacional, essa prevenção poderia ter evitado 9.770 (IC95%: 9.690–9.870) mortes prematuras em todo o Brasil. Para o ano de 2019 foi estimada 3.400 (IC95%: 3.300–3.550) mortes adicionais em toda a Bacia Amazônica (BUTT *et al.*, 2020).

Em outro estudo realizado também com base na emissão de partículas na Bacia Amazônica, Reddington *et al.* (2015) estimaram que apenas o MP_{2,5} derivado de incêndios por desmatamento, causaram entre 2002 e 2012 uma média de 2.906 mortes (IC95%: 1.065–4.714) por doenças cardiopulmonares em todo o continente sul-americano, incluindo o câncer de pulmão.

2.4 Justificativa

Embora a problemática da exposição a partículas emitidas por eventos de queimadas e incêndios florestais seja similar àquela derivada da emissão de partículas da poluição do tipo urbana (industrial e veicular), a atenção sobre o monitoramento e os efeitos da qualidade do ar na saúde humana são mais direcionadas para os grandes centros urbanos, como os da região sudeste do Brasil (PEREIRA; LIMONGI, 2015; SANTOS *et al.*, 2020; VORMITTAG *et al.*,

2021). Além disso, o caráter sazonal da ocorrência de queimadas e incêndios florestais nas regiões Central e Norte do Brasil, que se concentram no pico da estiagem, não indicam a magnitude de exposição a qualidade inadequada do ar a qual suas populações são submetidas. Por isso a quantificação do tempo de exposição a concentrações inadequadas de $MP_{2,5}$ e seu impacto na saúde cardiopulmonar de ambas as regiões através do uso de indicadores, podem evidenciar áreas de risco que merecem priorização das políticas de prevenção e controle da qualidade do ar, assim como é visto para regiões metropolitanas.

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

Realizar uma caracterização da magnitude de exposição a má qualidade do ar decorrente da emissão de partículas finas ($MP_{2,5}$) por queimadas e incêndios florestais e quantificar o seu impacto na saúde cardiopulmonar da região Centro-Norte do Brasil, entre 2010-2019

3.2 Específicos

➤ Propor a utilização de um indicador do tempo de exposição a concentrações inadequadas do poluente material particulado fino ($MP_{2,5}$), entre os anos de 2010 e 2019 na região Amazônica e Centro-Oeste do Brasil.

➤ Estimar o número e a fração da morbimortalidade por doenças cardiopulmonares atribuíveis à exposição de curto e longo prazo ao $MP_{2,5}$, em cidades da região Amazônica brasileira no arco do desmatamento, entre os anos de 2010 e 2019.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, A.; RODRIGUES, L.; CASTRO, I. **Amazônia em chamas**: o que queima - e onde: nota técnica nº 5. Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, ago., 2020. Disponível em: <https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2020/08/NT5-pt-final.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.

BARBOSA, M. L. F. *et al.* Recent trends in the fire dynamics in Brazilian Legal Amazon: Interaction between the ENSO phenomenon, climate and land use. **Environmental Development**, 2021.

BARLOW, J. *et al.* Clarifying Amazonias's burning crisis. **Global Change Biology**, 2019.

BRASIL. Decreto nº 10.424, de 15 de julho de 2020. Determina a suspensão da permissão do emprego do fogo de que trata o Decreto nº 2.661, de 8 de julho de 1998, no território nacional pelo prazo de cento e vinte dias. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 de jul. de 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.424-de-15-de-julho-de-2020-267035345>. Acesso em: 29 mar. 2022.

BRASIL. Decreto nº 10.735, de 28 de junho de 2021. Determina a suspensão da permissão do emprego do fogo de que trata o Decreto nº 2.661, de 8 de julho de 1998, no território nacional pelo prazo de cento e vinte dias. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 29 de jun. de 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.735-de-28-de-junho-de-2021-328568984#:~:text=Di%C3%A1rio%20Oficial%20da%20Uni%C3%A3o,-Publicado%20em%3A%2029&text=Determina%20a%20suspens%C3%A3o%20da%20permis%C3%A3o,que%20lhe%20confere%20o%20art>

BUTT, E. W. *et al.* Large air quality and human health impacts due to Amazon forest and vegetation fires. **Environ Res Commun.**, 2020.

BUTT, E. W. *et al.* Large air quality and public health impacts due to Amazonian deforestation fires in 2019. **GeoHealth**, v. 5, 2021.

CAMEY, S. A.; AGRANONIK, M.; RADAELLI, J.; HIRAKATA, V. N. Fração atribuível populacional. **Rev HCPA**, v. 30, n. 1, p. 77-85, 2010.

CANÇADO, J. E. D.; BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; ARBEX, M. A.; SALDIVA, P. H. N.; SANTOS, U. P. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 32, p. 5-11, 2006. Suppl 1.

CARMO, C. N.; ALVES, M. B.; HACON, S. S. Impact of biomass burning and weather conditions on children's health in a city of Western Amazon region. **Air Qual Atmos Health**, v. 6, p. 517-525, 2013.

CARMO, C. N.; HACON, S.; MOURÃO, D.; LOUZANO, F.; LONGO, K.; FREITAS, S.; ARTAXO, P. **Queima de biomassa e doenças respiratórias na região Amazônica: uma aplicação de modelos aditivos generalizados**. 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Saulo_Freitas/publication/242094344_QUEIMA_DE_BIOMASSA_E_DOENCAS_RESPIRATORIAS_NA_REGIAO_AMAZONICA_UMA_APLICACAO_DE_MODELOS_ADITIVOS_GENERALIZADOS/links/54f52b980cf2eed5d73670a0/QUEIMA-DE-BIOMASSA-E-DOENCAS-RESPIRATORIAS-NA-REGIAO-AMAZONICA-UMA-APLICACAO-DE-MODELOS-ADITIVOS-GENERALIZADOS.pdf Acesso em: 12 abr. 2020.

CARMO, C. N.; HACON, S.; LONGO, K. M.; FREITAS, S.; IGNOTTI, E.; LEON, A. P.; ARTAXO, P. Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 27, n. 1, p. 10-16, 2010.

CARVALHO, N. S. *et al.* Spatio-temporal variation in dry season determines the Amazonian fire calendar. **Environ. Res. Lett.**, v.16, 2021.

CÉSAR, A. C.; NASCIMENTO, L.F.; MANTOVANI, K.C.; VIEIRA, L.C. Fine particulate matter estimated by mathematical model and hospitalizations for pneumonia and asthma in children. **Revista Paulista de Pediatria**, v. 34, n. 1, p. 18-23, 2016.

COLOMBINI, M. P. Poluição atmosférica e seu impacto no sistema cardiovascular. **Einstein**, v. 6, n 2, p. 221-226, 2008.

EPA (Environmental Protection Agency). **Particulate matter (PM) basics**. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>. Acesso em: 01 mar. 2022.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; DIAS, M. A. F. S.; DIAS, P. L. S. Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul. **Estudos Avançados**, v.19, n. 53, p. 167-185, 2005.

HUMAN RIGHTS WATCH (HRW); INSTITUTO DE ESTUDOS PARA POLÍTICAS DE SAÚDE (IEPS); INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM). **O ar é insuportável**: os impactos das queimadas associadas ao desmatamento da Amazônia brasileira na saúde. 2020, 58p. Disponível em: https://www.hrw.org/sites/default/files/media_2020/08/brazil0820pt_web.pdf. Acesso em: 20 jun. 2020.

IGNOTTI, E.; HACON, S.S.; JUNGER, W.L.; MOURÃO, D.; LONGO, K.; FREITAS, S.; ARTAXO, P.; LEÃO, A. C. M. P. Air pollution and hospital admissions for respiratory diseases in the subequatorial Amazon: a time series approach. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 26, n. 4, p. 747-761, 2010a.

IGNOTTI, E.; VALENTE, J. G.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; HACON, S. D.; ARTAXO NETTO, P. Impact on human health of particulate matter emitted from burnings in the Brazilian Amazon region. **Revista Saúde de Publica**, v. 44, n. 1, p. 121-130, 2010b.

IQAIR. **2021 World Air Quality Report**: region & city PM2.5 ranking. 2021, 43p. Disponível em: <https://www.iqair.com/us/world-air-quality-report>. Acesso em: 20 jun. 2022.

JACOBSON, L. S. V.; HACON, S. S.; CASTRO, H. A.; IGNOTTI, E.; ARTAXO, P.; LEON, A. C. M. P. Acute Effects of Particulate Matter and Black Carbon from Seasonal Fires on Peak Expiratory Flow of Schoolchildren in the Brazilian Amazon. **PLOS ONE**, v. 9, ago. 2014.

JACOBSON, L. S. V.; HACON, S. S.; CASTRO, H. A.; IGNOTTI, E.; ARTAXO, P.; SALDIVA, P. H. N.; LEON, A. C. M. P. Association between fine particulate matter and the peak expiratory flow of School children in the Brazilian subequatorial Amazon: A panel study. **Environmental Research**, v. 117, p. 27–35, 2012.

MACHIN, A. B.; NASCIMENTO, L. F. C. Efeitos da exposição a poluentes do ar na saúde das crianças de Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 34, n. 3, p. 1-9, 2018.

MACHIN, A. B.; NASCIMENTO, L. F.; MANTOVANI, K.; MACHIN, E. B. 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, n. 2, 2019.

MANTOVANI, K. C. C.; NASCIMENTO, L. F. C.; MOREIRA, D. S.; VIEIRA, L. C. P. F. S.; VARGAS, N. P. Poluentes do ar e internações devido a doenças cardiovasculares em São José do Rio Preto, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 21, n.2, p. 509-515, 2016.

MAPBIOMAS. **As cicatrizes deixadas pelo fogo no território brasileiro (Coleção 1)**. Ago, 2021, 10p. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Fact_Sheet.pdf. Acesso em: 12 de out. 2021.

MASCARENHAS, M. D. M.; VIEIRA, L. C.; LANZIERI, T. M.; LEAL, A. P. P. R.; DUARTE, A. F.; HATCH, D. L. Poluição atmosférica devida à queima de biomassa florestal e atendimentos de emergência por doença respiratória em Rio Branco, Brasil - setembro, 2005. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 34, n. 1, p. 42-46, 2008.

MENEZES, R. A. M.; PAVANITTO, D. R.; NASCIMENTO, L. F. C. Exposição a poluentes do ar e doença respiratória em meninos e meninas. **Revista Paulista de Pediatria**, v. 37, n. 2, p. 166-172, 2019.

MILLER, M. R.; SHAW, C. A.; LANGRISH, J. P. From particles to patients: oxidative stress and the cardiovascular effects of air pollution. **Future Cardiology**, v. 8, n.4, p. 577–602, 2012.

NASCIMENTO, L. F. C.; VIEIRA, L. C. P. F.; MANTOVANI, K. C. C.; MOREIRA, D. S. Air pollution and respiratory diseases: ecological time series. **São Paulo Med J**, v. 134, n. 4, p. 315-321, 2016.

NAWAZ, M. O.; HENZE, D. K. Premature deaths in Brazil associated with long-term exposure to PM 2.5 from Amazon fires between 2016-2019. **GeoHealth**, 2020.

NUNES, K. V. R.; IGNOTTI, E.; HACON, S. S. Circulatory disease mortality rates in the elderly and exposure to PM2.5 generated by biomass burning in the Brazilian Amazon in 2005. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 3, p. 589-598, mar, 2013.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. *et al.* Fire foci in South America: impact and causes, fire hazard and future scenarios. **Journal of South American Earth Sciences**, v.112, 2021.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. *et al.* Fire foci related to rainfall and biomes of the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.282–283, 2020.

PATTO, N. V.; NASCIMENTO, L. F.; MANTOVANI, K. C.; VIEIRA, L. C. P. F. C.; MOREIRA, D. S. Exposure to fine particulate matter and hospital admissions due to pneumonia: Effects on the number of hospital admissions and its costs. **Rev Assoc Med Bras**, v. 62, n. 4, p. 342-346. 2016.

PEREIRA, B. B.; LIMONGI, J. E. Epidemiologia de desfechos na saúde humana relacionados à poluição atmosférica no Brasil: uma revisão sistemática. **Cad. Saúde Colet.**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 91-100, 2015.

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

REZENDE, L. F. M.; ELUF-NETO, J. Fração atribuível populacional: planejamento de ações de prevenção de doenças no Brasil. **Revista de Saúde Pública**, v. 50, n. 3, p. 1-6, 2016.

RODRIGUES, C. G.; VORMITTAG, E. M. P. A; CAVALCANTE, J. A.; SALDIVA, P. H. N. Projeção da mortalidade e internações hospitalares na rede pública de saúde atribuíveis à poluição atmosférica no Estado de São Paulo entre 2012 e 2030. **R. bras. Est. Pop.**, Rio de Janeiro, v.32, n.3, p.489-509, set./dez. 2015.

SANDOVAL, B.; REYES, T.; OYARZÚN, M. Mecanismos de los efectos nocivos para la salud de la contaminación atmosférica proveniente de incendios forestales. **Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias**, v. 35, p. 49-57, 2019.

SANT'ANNA, A. A.; ROCHA, R. **Impactos dos incêndios relacionados ao desmatamento na Amazônia brasileira sobre saúde**. Nota Técnica n.11. IEPS: São Paulo, 2020. Disponível em: https://www.hrw.org/sites/default/files/media_2020/08/Health%20Impacts%20of%20Deforestation-Related%20Fires%20in%20the%20Amazon_PT_1.pdf. Acesso em: 18 dez. 2021.

SANTOS, U. P. *et al.* Poluição do ar ambiental: efeitos respiratórios. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 47, n. 1, 2021.

SILVA, A. M. C.; MATTOS, I. E.; IGNOTTI, E.; HACON, S. S. Material particulado originário de queimadas e doenças respiratórias. **Revista de Saúde Pública**, v. 47, n. 2, p. 345-352, 2013.

SILVÉRIO *et al.* **Amazônia em chamas**: nota técnica nº1. Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, ago., 2019. 9p. Disponível em: https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2019/08/NotaTe%CC%81cnica_AmazoniaemChamas-pt.pdf. Acesso em: 11 abr. 2020.

VORMITTAG, E. M. P. A. A. *et al.* Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 35, n.102, p. 7-30, 2021

WHO (World Health Organization). **Ambient air pollution**: a global assessment of exposure and burden of disease. Geneva: World Health Organization, 2016, 131p. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1>. Acesso em: 11 abr. 2020.

WHO (World Health Organization). **WHO global air quality guidelines**: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021, 16p. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433-eng.pdf> Acesso em: 20 de out. 2021.

YE *et al.* Risk and burden of hospital admissions associated with wildfire-related PM2.5 in Brazil, 2000-15: a nationwide time-series study. **The Lancet Planet Health**, v.5, n.9, p. e599-607, 2021.

CAPÍTULO I:
POLUIÇÃO DO AR POR QUEIMADAS E INCÊNDIOS FLORESTAIS COMO
RISCO AMBIENTAL PARA MILHÕES DE HABITANTES DA AMAZÔNIA
BRASILEIRA: INDICADOR DE EXPOSIÇÃO PARA A SAÚDE HUMANA

RESUMO

OLIVEIRA, Igor Neves de. **Poluição do ar por queimadas e incêndios florestais como risco ambiental para milhões de habitantes da Amazônia brasileira**: indicador de exposição para a saúde humana. Cáceres: UNEMAT, 2022. 92 p. (Dissertação - Mestrado em Ciências Ambientais) ¹.

Neste estudo propomos, de acordo com o limite recomendado pela Organização Mundial de Saúde, a utilização de um indicador do tempo de exposição a concentrações inadequadas à saúde humana de material particulado fino (MP_{2,5}), para a região Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010-2019. Utilizando médias diárias de MP_{2,5} obtidos do Sistema de Informações Ambientais Integrado a Saúde (SISAM), foram calculados para ano e mês, o número percentual de dias cujas concentrações excederam o limite de 15µg/m³. Os resultados foram apresentados em mapas de Interpolação IDW e em gráficos de distribuição. A fim de comparar a área afetada pela má qualidade do ar com registros de focos de calor, também foram produzidos mapas para a ocorrência de fogo. Verificou-se que maiores extensões territoriais com os maiores percentuais de dias com qualidade inadequada do ar ocorreram em 2015. Entre todo o período analisado, os meses entre agosto e outubro são o de percentuais mais elevados e que alcançam maior extensão territorial, coincidindo com a maior ocorrência de focos de calor. O estado do Amazonas e a região do arco do desmatamento concentraram os dez municípios com os piores percentuais em toda a década. Os dados demonstram que na estiagem os percentuais alcançam 75 a 100% dos dias do mês e para períodos anuais, ultrapassam 25%, que equivale a 3 meses ou mais de exposição a má qualidade do ar. O indicador proposto é reprodutível e apropriado para evidenciar tempo de exposição a má qualidade do ar. O indicador proposto demonstrou exposições a longos períodos de má qualidade do ar por mais de 20 milhões de habitantes da Amazônia e Centro-Oeste do Brasil.

Palavras-chave: fogo, focos de calor, material particulado, poluição atmosférica.

¹ Orientadora: Eliane Ignotti, UNEMAT

ABSTRACT

OLIVEIRA, Igor Neves de. **Air pollution by fires and forest fires as an environmental risk for millions of inhabitants of the Brazilian Amazon: indicator of exposure to human health.** Cáceres: UNEMAT, 2022. 92 p. (Dissertation - Master in Environmental Sciences) ¹.

In this study, we propose, according to the limit recommended by the World Health Organization, the use of an indicator of exposure time to inadequate concentrations for human health of fine particulate matter (PM_{2.5}), for the Amazon region and Midwest of Brazil, between 2010-2019. Using daily averages of PM_{2.5} obtained from the Brazil's Health-Integrated Environmental Information System (SISAM), the percentage number of days whose concentrations exceeded the limit of 15µg/m³ were calculated for year and month. The results were presented in IDW Interpolation maps and in distribution graphs. In order to compare the area affected by poor air quality with records of hotspots, maps were also produced for the occurrence of fire. It was found that the largest territorial extensions with the highest percentages of days with inadequate air quality occurred in 2015. Among the entire period analyzed, the months between August and October have the highest percentages and reach the largest territorial extension, coinciding with the greater occurrence of hotspots. The state of Amazonas and the region of the arc of deforestation concentrated the ten municipalities with the worst percentages in the entire decade. The data show that in the dry season the percentages reach 75 to 100% of the days of the month and for annual periods, they exceed 25%, which is equivalent to 3 months or more of exposure to poor air quality. The proposed indicator is reproducible and appropriate to show exposure time to poor air quality. The proposed indicator demonstrated exposure to long periods of poor air quality by more than 20 million inhabitants of the Amazon and Midwest of Brazil.

Keywords: fire, hotspots, particulate matter, atmospheric pollution.

¹ Major Professor: Eliane Ignotti, UNEMAT

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, historicamente, convive intensamente com eventos críticos de queimadas e incêndios florestais. Em 36 anos (1985-2020), o fogo no Brasil esteve presente em uma área maior que a da Inglaterra, queimando por ano 150.957 km² (1,8% do país) e que representa até o momento, um acumulado de 1.672.142 km² (19,6%) em território consumido por queimadas e/ou incêndios florestais. Dentre os cinco biomas brasileiros, os mais atingidos proporcionalmente a suas áreas, foram o Pantanal (57%), Cerrado (36%) e a Floresta Amazônica (16,4%), sendo os dois últimos, representantes de 85% de toda área queimada (MAPBIOMAS, 2021).

Nas regiões Centro-Oeste e Norte do país, onde os focos de queimadas são registrados com maior frequência, o calor gerado e a menor densidade das partículas e gases formados, em relação ao ar, resulta na elevação desses produtos, que em associação com a ação de correntes de ar tem como efeito o seu deslocamento e dispersão do nível local, para regional e até continental (FREITAS et al. 2005). Esse fenômeno resulta na exposição de um número maior de pessoas aos contaminantes atmosféricos, que podem causar aumento da morbimortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias (IGNOTTI *et al.*, 2010a; JACOBSON *et al.*, 2012, 2014; NUNES; IGNOTTI; HACON, 2013). No Brasil a preocupação com os efeitos da poluição atmosférica na saúde humana é direcionada, em sua maioria, às regiões metropolitanas, cujas exposições são provenientes majoritariamente de fontes de combustíveis fósseis ou de produção industrial (PEREIRA; LIMONGI, 2015; SANTOS *et al.*, 2020).

A região Norte que representa a maior parte da Amazônia brasileira e a região Centro-Oeste são menos industrializadas, quando comparadas às outras regiões do Brasil, mas apresentam grande extensão territorial e uma população residente de 40 milhões de habitantes (IBGE, 2021). Em períodos de queimadas esses habitantes inalam ar com níveis de poluição que ultrapassam em até oito vezes os limites máximos recomendados como aceitáveis pela Organização Mundial da Saúde (OMS), para parâmetros de Material particulado fino (MP_{2,5}) (HRW; IEPS; IPAM, 2020).

Essa população tem acesso limitado às informações relativas ao nível de qualidade do ar, que deveriam ser comumente divulgados pelos governos e agências reguladoras tanto da área ambiental quanto da saúde (VORMITTAG *et al.*, 2021). Nas poucas localidades onde são divulgadas, geralmente essas informações se limitam a medidas de tendência central, como médias diárias e anuais. No entanto, para exposições sazonais como as provocadas por queimadas e incêndios florestais, elas nem sempre expressam a magnitude da exposição a má qualidade do ar ao qual esses residentes são submetidos anualmente, pois não demonstram o tempo de exposição.

Neste estudo, propomos a utilização de um indicador do tempo de exposição a concentrações inadequadas do poluente material particulado fino (MP_{2,5}), de acordo com o limite recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) - 15µg/m³ - (WHO, 2021), analisando o período entre os anos de 2010 e 2019 na região Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, área que abriga os três biomas mais degradados pelo fogo nos últimos anos: Amazônia, Cerrado e Pantanal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo incluiu toda a região da Amazônia Legal Brasileira e parte do seu entorno. Foram incluídos todos os municípios das Unidades da Federação das regiões Norte (Acre, Amapá, Amazonas, Rondônia, Pará, Roraima e Tocantins), Centro-Oeste (Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) e do estado do Maranhão (Figura 1). Apesar de não estarem dentro dos limites da Amazônia Legal, mas por fazerem parte do bioma Cerrado, optou-se por manter na área de estudo os municípios do estado do Maranhão localizados ao leste do meridiano 44°. São 1.134 municípios ocupando uma área de cerca de 6 milhões de km², o equivalente a 68% do território brasileiro, com mais de 42 milhões de habitantes em 2021 (IBGE, 2020, 2021).

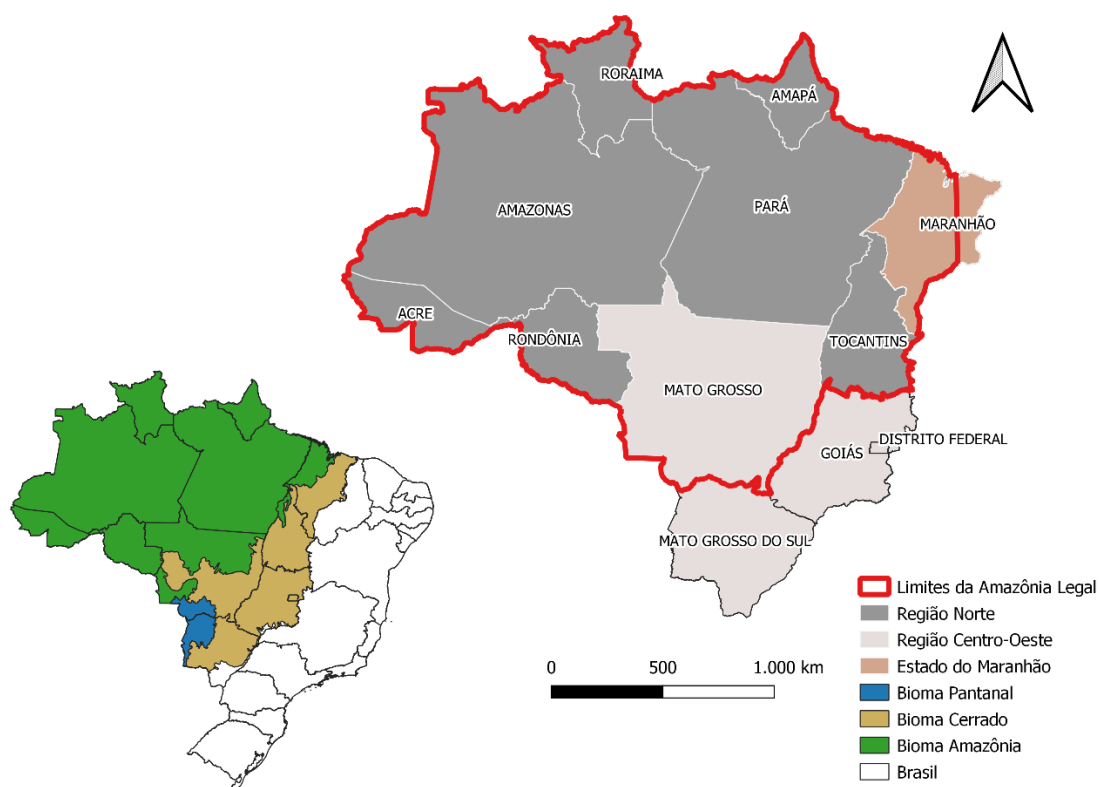


Figura 1 - Área de estudo: Região da Amazônia Legal e Centro-Oeste do Brasil. Fonte: IBGE (Malha Municipal Digital da Divisão Político-Administrativa Brasileira, 2020).

2.2 Coleta e processamento dos dados

2.2.1 Dados de qualidade do ar e focos de calor

Para avaliar a qualidade do ar, optou-se pelas concentrações diárias de material particulado fino ($MP_{2,5}$), por se tratar da fração fina e inalável de aerossóis e ser fortemente relacionado com a ocorrência de queimadas e incêndios florestais, além do seu conhecido efeito deletério sobre a saúde (REDDINGTON *et al.*, 2015; YE *et al.*, 2021). Também foram coletados o número diário de focos de calor em vegetação.

Todos os dados foram obtidos do Sistema de Informações Ambientais Integrado a Saúde (SISAM), que fornece medidas para quatro períodos do dia:

às 00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 horas. Nesse sistema, as medidas de $MP_{2,5}$ são estimadas por meio do modelo CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*: CAMS-*Reanalysis* entre 2010-2017 e CAMS-*Nrealtime* entre 2018-2019) do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com resolução espacial de 0,125 graus (aproximadamente 12,5 km). A detecção de focos de calor é feita a partir de imagens dos sensores óticos na faixa termal-média de aproximadamente $4\mu m$ dos satélites polares, as AVHRR/3 dos NOAA-18, NOAA-19 e METOP-B, as MODIS dos NASA TERRA e AQUA e as VIIRS do NPP-Suomi e NOAA-20 e, as imagens dos satélites geoestacionários, GOES-16 e MSG-3. O satélite de referência usado é o AQUA_M-T (sensor MODIS, com passagem no início da tarde). Através dessas estimativas horárias, foram calculadas para cada município as médias aritméticas para a concentração de $MP_{2,5}$ e o somatório de focos de calor.

2.2.2 Estimativas populacionais

As estimativas da população residente nos municípios durante o período em estudo foram obtidas do Estudo de Estimativas populacionais do Ministério da Saúde, disponibilizadas por meio do Departamento de Informática do SUS (DATASUS). Os dados populacionais foram necessários para análise da população exposta ao ar com níveis de concentração considerados inadequados.

2.2.3 Cálculo do indicador de exposição: percentual de dias com qualidade do ar inadequada para saúde humana

De acordo com as Diretrizes Globais da Qualidade do Ar elaborado pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021), a qualidade inadequada do ambiente atmosférico para um dia é alcançada quando a concentração média do $MP_{2,5}$ ultrapassa o limiar de $15\mu g/m^3$. Tomando como base esse parâmetro, foram calculadas para todos os municípios os percentuais de dias cujas

concentrações excederam o limite recomendado, assumido neste estudo como “má qualidade do ar”.

O percentual de dias com má qualidade do ar foi calculado, conforme as seguintes equações, para cada ano da série em estudo **(a)**, para cada mês considerando toda a década **(b)**, para toda a década **(c)** e o mês de cada ano **(d)**.

$$(a) = \frac{\sum n^{\circ} \text{ de dias no ano com } MP_{2,5} > 15\mu\text{g}/\text{m}^3}{365} * 100\%$$

$$(b) = \frac{\sum n^{\circ} \text{ de dias no mês (na década) com } MP_{2,5} > 15\mu\text{g}/\text{m}^3}{10 * 30} * 100\%$$

$$(c) = \frac{\sum n^{\circ} \text{ de dias na década com } MP_{2,5} > 15\mu\text{g}/\text{m}^3}{365 * 10} * 100\%$$

$$(d) = \frac{\sum n^{\circ} \text{ de dias no mês com } MP_{2,5} > 15\mu\text{g}/\text{m}^3}{30} * 100\%$$

2.3 Análise espaço-temporal dos dados

Foram criados mapas dos indicadores de exposição ao $MP_{2,5}$ utilizando-se o método geoestatístico de interpolação baseado no *Inverse of Distance Weighted* (IDW). A técnica consiste na predição de valores para locais sem informação, baseada na ponderação dos valores de pontos amostrais, que neste caso é representado pelo indicador de cada município. O método pressupõe que valores mais próximos terão maior peso nas estimativas do que os mais distantes. (MURARA, 2019).

Para complementar a descrição da exposição, foram apresentadas as estatísticas descritivas para a média diária de $MP_{2,5}$ e os gráficos de distribuição dos indicadores. Também foram produzidos mapas de interpolação IDW com o padrão anual e mensal para a ocorrência de fogo, calculados a partir do número de focos de calor em vegetação. O processamento dos dados e gráficos foram

realizados no *software* R, versão 4.0.2 e os mapas de interpolação no ArcGIS, versão 10.5.

3. RESULTADOS

Anos como 2010, 2015 e 2017 apresentaram números de focos mais elevados que os demais, sendo 2010 o maior, com 243.625 focos, 30% a mais que o segundo maior (2017, com 167.221 focos) (Figura 2). Por outro lado, os menores valores foram observados em 2011, 2013 e 2018, sendo 2013 o menor número total entre os três anos (95.809 focos).

O padrão espacial mostrou que o Pará foi o estado mais afetado em todos os anos. No geral, os totais anuais acumulados demonstraram que as áreas que mais queimam são representadas principalmente pelo bioma pantanal e por uma faixa central no bioma Amazônico que se entende do Acre e Rondônia, passando pelo sul do Amazonas e norte de Mato Grosso até o centro-sul do Pará, com limite norte até o extremo noroeste do Pará e o limite sul em áreas do nordeste e noroeste de Mato Grosso (divisa com o Cerrado). Desanexo a esta faixa central, ainda representam regiões de destaque o sudoeste do Maranhão e o nordeste de Tocantins.

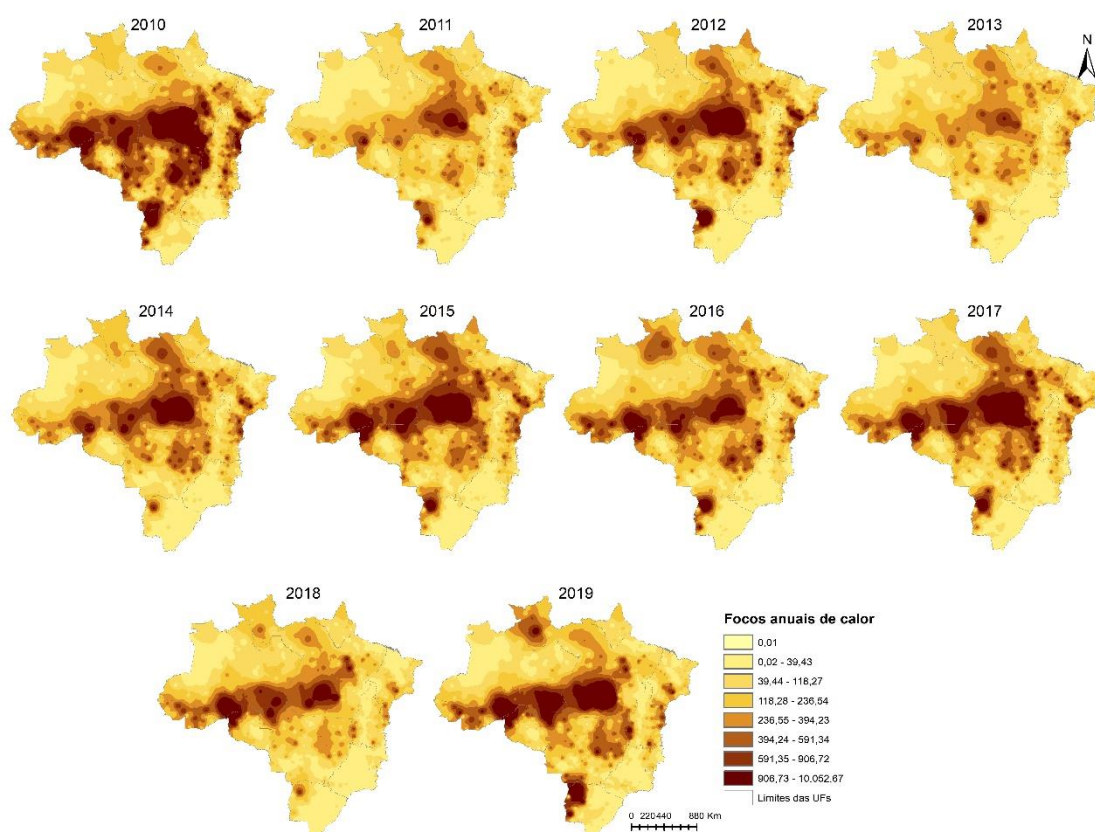


Figura 2 - Número anual de focos de calor nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010-2019. Fonte: Sistema de Informações Ambientais Integrado a Saúde (SISAM, 2021).

O acumulado de focos em cada mês indica o padrão espacial de dispersão do evento e sua intensidade no decorrer do ano (Figura 3). Nota-se que os maiores números de focos começam a tomar grande parte do território no mês de julho, com números máximos atingindo agosto e setembro. Esse período afeta principalmente o bioma pantanal e a faixa central do bioma amazônico. Entre outubro, novembro e dezembro os focos de calor perdem frequência nessas regiões e começam a tomar maiores proporções no norte dos estados do Pará, Maranhão e Amapá. Entre janeiro e abril, apenas o estado de Roraima é atingido com maior intensidade.

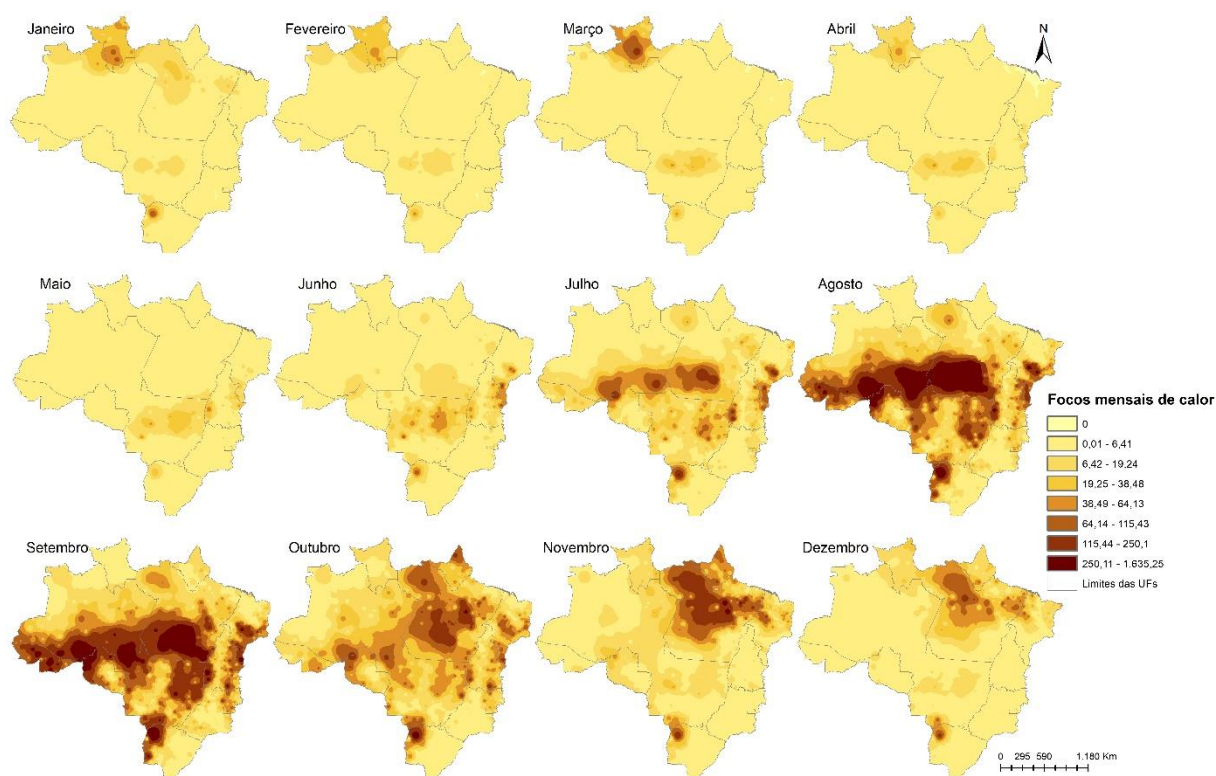


Figura 3 - Número mensal de focos de calor nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010-2019. Fonte: Sistema de Informações Ambientais Integrado a Saúde (SISAM, 2021).

Em relação ao indicador dos percentuais anuais, que caracterizam o tempo de exposição a má qualidade do ar foram observadas áreas extensas com mais de 15% dos dias com má qualidade do ar em todos os anos, ou seja, em dois ou mais meses de cada ano as populações estavam expostas a má qualidade do ar (Figura 4). As maiores áreas com os maiores percentuais (35 a 60%) ocorreram no ano de 2015, o que equivale a exposições prolongadas de 4 a 7 meses. As menores áreas com proporções elevadas foram verificadas para 2013, cujos percentuais máximos ficaram entre 35 e 45% (4 a 5 meses), restritas aos estados do Amazonas, Mato Grosso e Pará.

Em relação às regiões geográficas, os percentuais mais elevados foram observadas nos estados da região norte e no Maranhão, além de Mato Grosso no Centro-Oeste (todos pertencentes a Amazônia Legal), enquanto as menores

proporções foram observadas nos estados de Mato Grosso do Sul (exceto para a região de Corumbá no Pantanal) e Goiás.

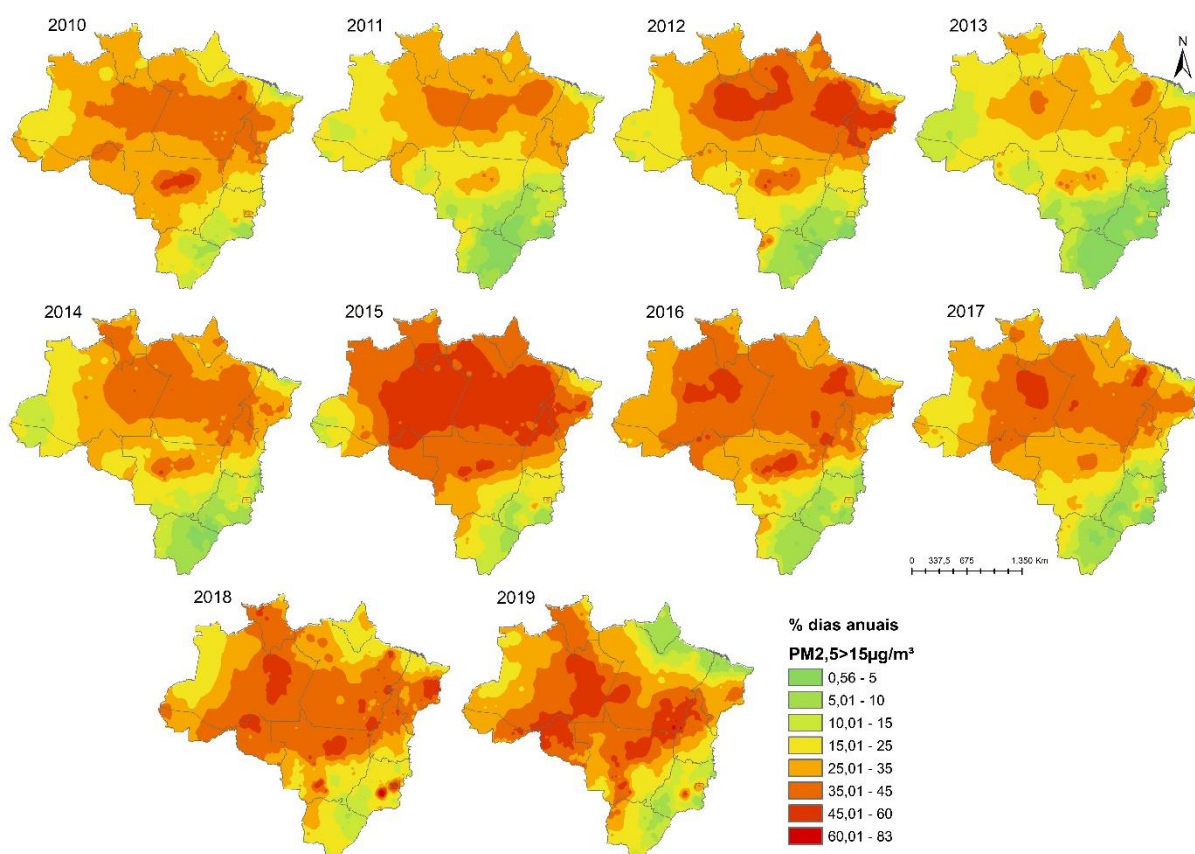


Figura 4 - Percentual anual* de dias cujas concentrações de $MP_{2,5}$ excederam $15 \mu g/m^3$ nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010-2019.

*Percentuais obtidos pela equação a.

Os percentuais mensais mostram o padrão sazonal da exposição. Entre os meses de agosto e dezembro é possível observar uma maior área com elevados percentuais que chegam a atingir entre 80 e 99% dos dias do mês (25 a 30 dias). Seus limites vão do extremo oeste do Acre ao sul/sudeste do Amazonas, centro-sul do Pará e Maranhão, entre a divisa de Tocantins e Goiás, engloba todo o estado de Rondônia e Mato Grosso, chegando até o pantanal sul mato-grossense. No primeiro quadrimestre, percentuais que ultrapassam 50% (mais de 15 dias/mês), bem como aqueles considerados os mais elevados para a época, entre 70-80% (20 a 25 dias/mês), se distribuem apenas em regiões do

extremo norte, ocupando parte dos estados de Roraima, Amapá e algumas áreas no norte do Amazonas e Pará (Figura 5).

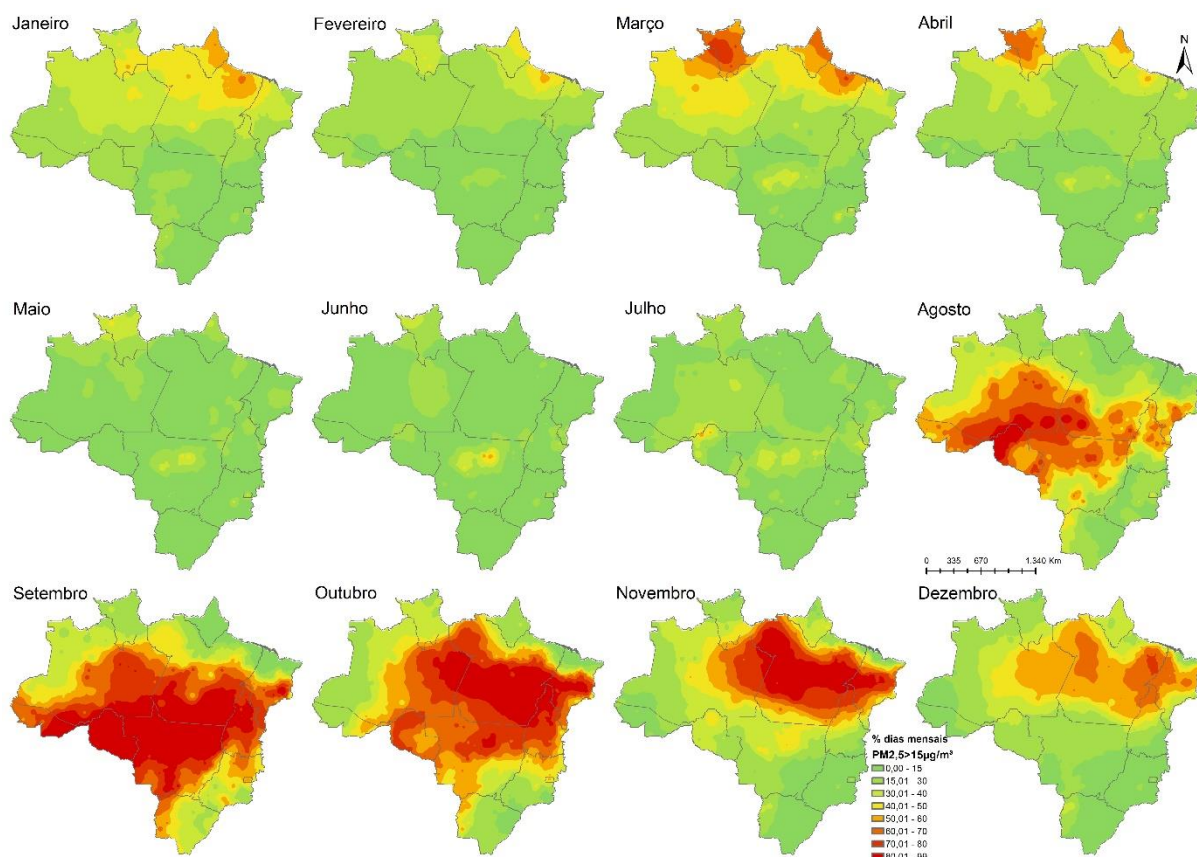


Figura 5 - Percentual mensal* de dias cujas concentrações de $MP_{2,5}$ excederam $15\mu g/m^3$ nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010-2019.

*Percentuais obtidos pela equação b.

A tabela a seguir apresenta o percentual da década e uma análise descritiva da exposição diária ao $MP_{2,5}$ para os dez municípios com os maiores percentuais do indicador de exposição e para todas as capitais incluídas no estudo. Os dez primeiros municípios apresentaram percentuais de 46 a 50%, equivalentes a 5 a 6 meses de exposição a má qualidade do ar a cada ano. Dentre as capitais, apenas Manaus esteve entre os dez primeiros; Belém alcançou 45% dos dias, seguida de Porto Velho com 43% (Tabela 01).

Municípios como Caseara-TO, Cláudia-MT, Feliz Natal-MT e Porto Velho-RO apresentaram os maiores níveis de exposição entre 2010 e 2019, com

médias diárias de $MP_{2,5}$ ultrapassando $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e os percentis 90º acima de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabela 1 – Dias (%) com concentrações de MP_{2,5} acima de 15µg/m³ e estatística descritiva de médias diárias de MP_{2,5} para as capitais e os municípios mais poluídos, localizados nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010 e 2019.

MUNICÍPIO	MP _{2,5} (µg/m ³) – 2010-2019								
	Nº acumulado de dias com PM _{2,5} >15µg/m ³	Nº percentual * de dias com PM _{2,5} >15µg/m ³	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão (SD)	Percentil 50º Mediana	Percentil 90º	Coefficiente de Variação (CV)**
Cláudia - MT	1.814	49,70	32,91	1,55	1.233,75	65,84	14,96	68,65	200%
Careiro - AM	1.751	47,97	18,83	1,90	373,55	18,76	14,65	31,42	100%
Manacapuru - AM	1.740	47,67	17,94	1,45	277,65	14,49	14,55	30,22	81%
Manaquiri - AM	1.740	47,67	18,23	1,50	347,65	16,65	14,58	30,57	91%
Manaus - AM	1.738	47,62	17,87	1,15	165,00	12,47	14,65	30,55	70%
Careiro da Várzea - AM	1.735	47,53	18,28	1,05	259,30	14,72	14,58	32,00	80%
Irlanduba - AM	1.732	47,45	17,97	1,20	548,90	14,97	14,60	31,05	83%
Nova Maringá - MT	1.706	46,74	24,37	0,73	635,18	34,07	13,90	49,40	140%
Caseara - TO	1.697	46,49	31,10	0,25	1.220,70	71,44	14,25	52,45	230%
Feliz Natal - MT	1.678	45,97	40,66	0,45	1.884,80	108,81	13,93	71,28	268%
Belém - PA	1.665	45,62	16,77	2,40	124,88	10,17	14,31	27,17	61%
Porto Velho - RO	1.567	42,93	29,82	1,80	1.136,53	61,99	13,60	58,00	208%
Brasília - DF	1.318	36,11	14,86	0,45	274,88	12,76	12,51	23,85	86%
Boa Vista - RR	1.259	34,49	14,61	1,78	105,85	8,85	12,58	24,09	61%
Goiânia - GO	1.254	34,36	14,23	0,75	99,93	9,00	12,30	25,15	63%
Palmas - TO	1.110	30,41	17,13	0,20	467,85	24,75	10,78	33,45	144%
Rio Branco - AC	1.100	30,14	18,51	0,25	539,00	30,54	11,10	31,62	165%

Cuiabá - MT	1.096	30,03	16,65	0,00	644,35	26,78	10,70	27,85	161%
Macapá - AP	867	23,75	12,19	0,60	126,45	9,21	9,65	22,15	76%
São Luís - MA	593	16,25	11,50	2,40	83,25	6,29	10,15	17,57	55%
Campo Grande - MS	384	10,52	8,62	0,50	137,48	8,83	6,75	15,20	102%

*Percentuais obtidos pela **equação c**; **CV=SD/Média*100.

A Figura 6 complementa a descrição desses municípios ao mostrar como se distribuem os percentuais anuais (Figura 6A e 6B) e trimestrais de maiores exposições identificados na Figura 5 (de janeiro a março e agosto a outubro). Nos dez municípios mais poluídos, o período entre agosto e outubro apresentou maior tempo de exposição a má qualidade do ar, com 75 a 100% dos dias (Figura 6F), cerca de 65-90/90 dias. No entanto, é possível notar que mesmo de forma moderada, os meses de janeiro a março possuem peso no tempo de exposição sobre os seis municípios do Amazonas, com percentuais em torno 35% (Figura 6D), cerca de 30/90 dias.

Para as capitais Boa Vista, Belém, Macapá e São Luís, localizadas mais ao extremo norte, os maiores tempos de exposição a má qualidade do ar se concentram nos primeiros meses do ano enquanto as demais, nos meses de agosto a outubro (Figura 6C e 6E).

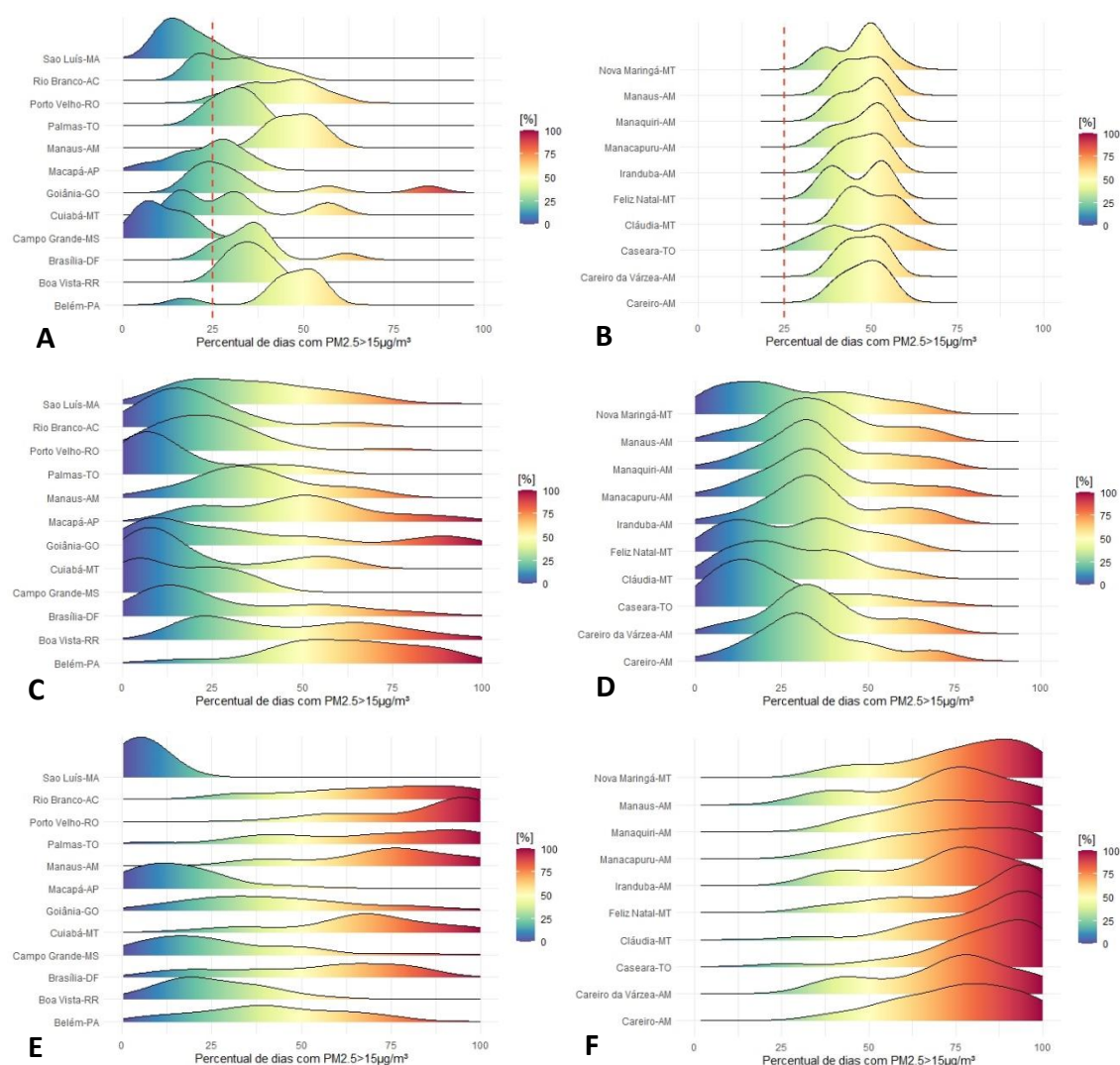


Figura 6 - Gráficos de distribuição dos percentuais de dias com concentrações de MP_{2,5} acima de 15µg/m³ nas capitais (à esquerda) e municípios mais poluídos das regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil, entre 2010 e 2019. As figuras A e B são percentuais anuais*, com linha tracejada indicando o ponto de 25% (3 meses); C e D são percentuais de janeiro a março**, E e F são percentuais de agosto a outubro**.

*Percentuais obtidos pela equação a; **percentuais obtidos pela equação d.

Na região Amazônica, em todos os anos, mais da metade (53-85%) da sua população ($\cong$ 15 milhões) foi exposta a má qualidade do ar por no mínimo 3 meses ao ano (Figura 7A). Os anos de 2015, 2016 e 2018 alcançaram os maiores números de residentes em exposição, seus percentuais acima de 80% corresponderam a totais que ultrapassaram 20 milhões de habitantes. Na região Centro-Oeste, a exposição de mais da metade da sua população ($\cong$ 8 milhões) ocorreu nos anos de 2010, 2015, 2018 e 2019 (Figura 7B). Os dois últimos

alcançaram os maiores percentuais de expostos, com valores acima de 60% e que representaram totais acima dos 9 milhões de habitantes. Para a população total da Amazônia e Centro-Oeste, em média, cerca de 24 milhões de habitantes foram submetidos a essa exposição por ano.

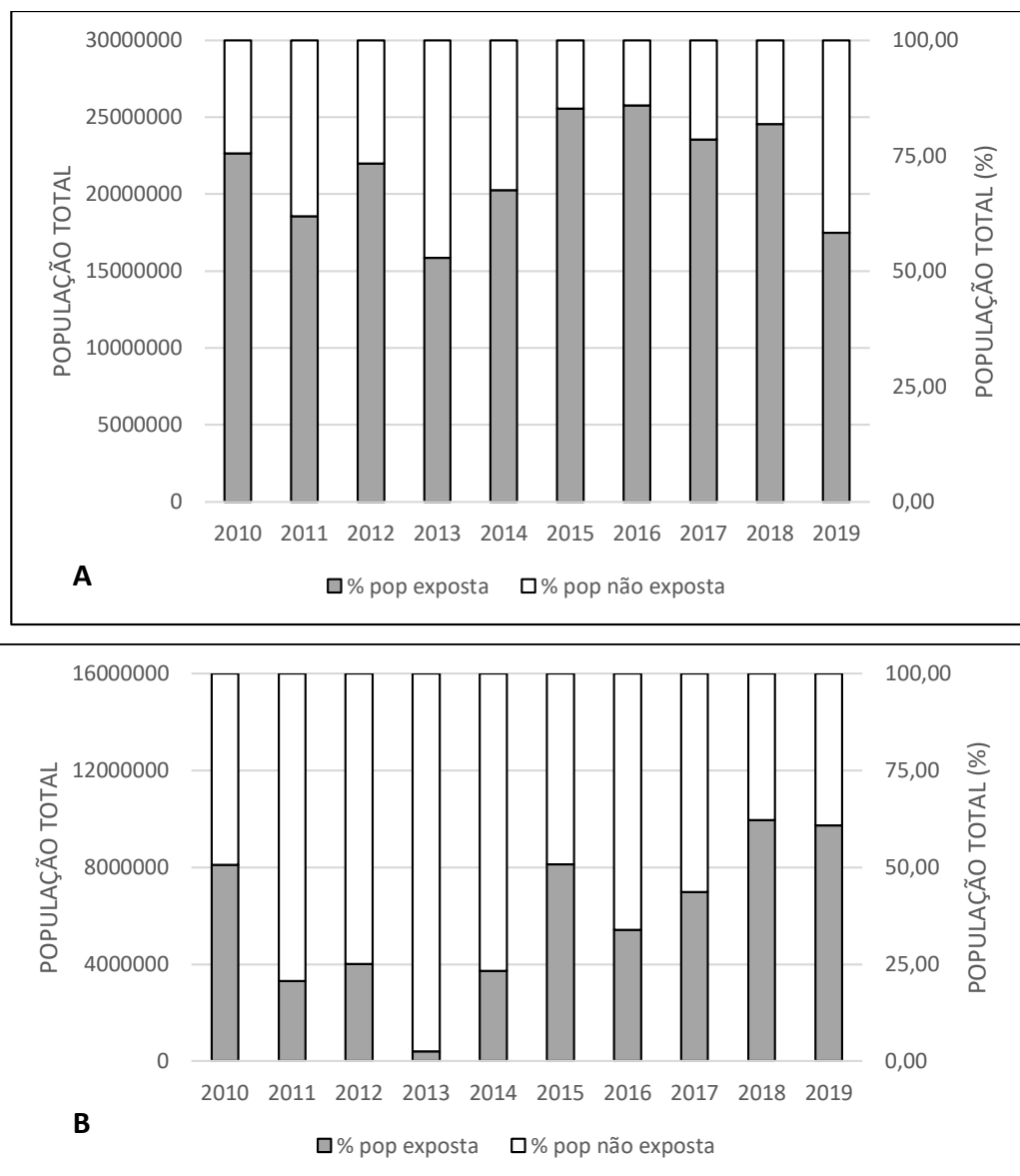


Figura 7 - Número absoluto e percentual da população da Amazônia brasileira* (A) e região Centro-Oeste** (B) exposta ao $MP_{2,5} > 15 \mu g/m^3$ em 25% (3 meses) ou mais dos dias do ano, entre 2010-2019. * Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins; ** Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

4. DISCUSSÃO

Por meio do indicador de proporção anual e mensal de dias cujo nível de material particulado fino excede os limites considerados aceitáveis pela Organização Mundial da Saúde foi possível combinar nível e tempo de exposição. O indicador nos revelou que milhões de residentes da região Amazônica e Centro-Oeste estiveram expostos a má qualidade do ar por períodos longos no ano, representados principalmente pelos meses de seca onde há maior registro de queimadas e incêndios florestais.

Os anos que apresentaram grandes áreas com maiores proporções de dias com má qualidade do ar, também foram que tiveram os maiores contingentes populacionais expostos à má qualidade do ar durante maior tempo. No geral, enquanto mais da metade da população habitante na Amazônia foi exposta a períodos longos de no mínimo 3 meses, na região Centro-Oeste essa exposição foi vivenciada geralmente pelas populações residentes no Pantanal e também do norte e sudoeste de Mato Grosso.

O alcance dos maiores contingentes populacionais expostos a um período mínimo de 3 meses pela região Centro-Oeste, entre 2018 e 2019, atribui-se a maior representatividade nesses anos de municípios do estado de Goiás e o Distrito Federal. Diferentemente dos demais anos, cujos maiores percentuais anuais ficaram restritos as localidades da Amazônia, sobretudo na região conhecida como arco do desmatamento, em 2018 as maiores proporções foram apresentadas pelo Distrito Federal e mais dez municípios da região metropolitana de Goiânia, inclusive com os maiores tempos de exposição registrados entre todos os anos (de 60 a 83%). O que poderia explicar essa exceção é que o ano em questão foi o primeiro com estimativas do modelo CAMS-*Nrealtime*, mas uma melhor investigação deve ser feita em um estudo futuro.

Apesar de não estarem inseridos em uma zona crítica para a presença de fogo, a porção central do Amazonas foi representada por seis das dez localidades com maiores percentuais de dias com má qualidade do ar na década. Essa representatividade parece estar ligada a influência que esses municípios e

o estado sofrem pela dispersão do MP_{2,5} originado da estiagem que atinge a região conhecida como arco do desmatamento, entre agosto e outubro, e o extremo norte no estado de Roraima, entre janeiro e março.

O padrão sazonal dos percentuais mensais de dias com concentrações de MP_{2,5} acima de 15µg/m³ foi semelhante ao padrão dos focos de calor. A presença de pequenas áreas com elevados percentuais de dias anuais com concentrações acima do recomendado em anos com menor frequência de focos de calor (2011 e 2013), sugerem que a redução de queimadas e incêndios florestais são determinantes para a melhoria da qualidade do ar em toda a região.

Queimadas e incêndios florestais são eventos que se alimentam de condições ambientais resultantes da combinação de três elementos fundamentais: fonte de ignição, temperaturas elevadas, e a disponibilidade de combustível, neste caso, biomassa vegetal seca (BOND; KEANE, 2017; ALENCAR *et al.*, 2020). A maior ocorrência de fogo visto nos anos de 2010, 2015 e 2017 podem estar relacionados a eventos extremos, como as grandes secas promovidas especialmente pelo fenômeno “El Niño” (2010 e 2015) e também aos recordes da temperatura média global nessa última década (2010-2020) (VASCONCELOS *et al.*, 2015; NASCIMENTO; SENNA, 2020; WMO, 2021).

A configuração espacial e sazonal dos maiores registros de focos de calor encontrada aqui para a Amazônia, foram similares aos achados de Carvalho *et al.* (2021), onde foi demonstrado que o pico na região centro-sul ocorre entre agosto e setembro, já na parte norte e oriental (nordeste), no primeiro e último trimestre do ano, respectivamente.

A expansão dos focos na faixa central da Amazônia, região conhecida como arco do desmatamento, sugere que a dinâmica do fogo é influenciada pelas condições climáticas ideais que se aliam aos padrões de cobertura e uso do solo nessa região. De acordo com Silvério *et al.* (2019) a ocorrência de focos na Amazônia e a prática do desmatamento possuem forte relação, mesmo em anos de estiagens mais brandas. Isso demonstra que a principal fonte de ignição desse bioma é a ação humana. Nesse sentido, vale destacar segundo Reddington *et al.* (2015) que a atenuação de incêndios associados

exclusivamente ao desmatamento pode causar reduções médias de aproximadamente 30% nas concentrações de partículas na superfície, principalmente na estação seca.

Conforme Delazeri (2016) o principal determinante para o desmatamento na Amazônia é a criação bovina. Entre 2016 e 2019, cerca de 64% dos focos de calor no bioma foram detectados em áreas recém-desmatadas ou já convertidas para uso agropecuário (ALENCAR; RODRIGUES, CASTRO, 2020). A dinâmica dos focos para 2019 também reforça uma tendência dos últimos anos para o aumento do fogo e desmatamento associado a ocupação ilegal e grilagem de terras nessa região (ALENCAR *et al.*, 2019, 2020).

O estado de Roraima obedece a uma configuração sazonal inversa de boa parte da área cujo pico para a ocorrência de focos se dá entre janeiro e abril. Segundo Alencar, Rodrigues e Castro (2020) o principal tipo de fogo que atinge essa federação, diferentemente das demais, são os “incêndios florestais”, que podem estar ligados a escapes de fogo proveniente de queimadas planejadas para o manejo de pastagens ou por atividades indígenas que é forte nesse estado.

O crescente desmatamento no bioma amazônico nesses últimos anos (PRODES/INPE, 2021), sobretudo a expansão do arco do desmatamento apontado recentemente pelo Instituto Socioambiental (2019), pode fazer com que essa região acumule cada vez mais material combustível para que períodos secos continuem trazendo temporadas de fogo cada vez mais severas (MOUTINHO *et al.*, 2020). E isso consequentemente trará para a região períodos longos de pior qualidade do ar, visto que nossos resultados indicam municípios do arco do desmatamento com níveis diários mais críticos em toda a área de estudo (médias acima de $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ressalta-se que embora a cidade de São Paulo localizada no Sudeste do país apresente no período de junho a setembro até 80% dos dias com médias de $\text{MP}_{2,5}$ acima dos limites aceitáveis de $15\text{mg}/\text{m}^3$, suas concentrações máximas diárias não excederam $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na área metropolitana (CETESB, 2020).

De acordo com o Projeto de Monitoramento do Desmatamento - PRODES (INPE, 2021), entre as últimas duas décadas o ano de 2012 foi o que

apresentou a menor taxa de desmatamento na região Amazônica (4,6 km²). E segundo Nepstad *et al.* (2014) essa redução esteve fortemente ligada ao sucesso da implementação de medidas mais efetivas contra essa prática entre 2004-2012, tais como: a criação de novas áreas protegidas, a introdução de leis ambientais nacionais e compromissos nas cadeias produtivas da soja e da carne bovina, restrições de acesso a crédito para produtores com ilegalidade na posse da terra ou que deixaram de cumprir regulamentos ambientais e também ao uso de imagens de satélite em tempo real para localizar a extração ilegal de madeira. Devido a cortes orçamentários essas mesmas políticas foram desfeitas nos anos posteriores. A menor taxa de desmatamento apresentada pelo ano de 2012 pode ter sido um fator relevante para que 2013 apresentasse o menor número de focos de calor e conseqüentemente os menores tempos de exposição a má qualidade do ar, pois a prática reduzida de desmatamento dentro desse período pode ter contribuído para que menos biomassa vegetal seca e disponível para queimadas e incêndios florestais fosse gerada.

No bioma Pantanal a ignição do fogo se mostra mais complexa, pois pode ser mediada tanto por atividades antrópicas como por fenômenos naturais. O fogo de origem humana também é fortemente ligado a atividades agropastoris, já por fenômenos naturais pode ocorrer devido ao acúmulo de material combustível no período seco e quente precedente ao período de enchente, o qual é submetido às condições de alta radiação solar, e também pela favorável ocorrência e propagação do fogo nas áreas com vegetação de savana existentes dentro desse bioma (MATOS; MATRICARDI; LEAL, 2018; VIGANÓ *et al.*, 2018).

Na Amazônia Brasileira, a emissão de poluentes por queimadas pode expor crianças e adolescentes a uma dose de MP_{2,5} duas vezes maior do que a dose de referência em que não observa efeitos adversos à saúde (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Estudos realizados em municípios da região Amazônica e Centro-Oeste, vem relatando a associação de efeitos agudos (imediatos, atrasados e acumulados) sobre a saúde respiratória, principalmente em crianças e idosos, com a exposição a concentrações aumentadas de MP_{2,5} (gradientes de 3,5µg/m³, 5µg/m³ e 10µg/m³) (CARMO *et al.*, 2010; IGNOTTI *et al.*, 2010a; JACOBSON *et al.*, 2012, 2014; CARMO; ALVES; HACON, 2013; SILVA *et al.*,

2013; MACHIN; NASCIMENTO, 2018; MACHIN *et al.*, 2019; MENEZES; PAVANITTO; NASCIMENTO, 2019; SANTANA *et al.*, 2020; YE *et al.*, 2021). Outros trabalhos evidenciam a relação desses particulados com maiores riscos para o desenvolvimento de problemas de natureza crônica. Silva *et al.* (2014) identificaram associações entre a exposição a altas concentrações de MP_{2,5} e nascimentos de bebês com baixo peso, em municípios da Amazônia e Cerrado. Alves *et al.* (2017) observaram que através da exposição de células do pulmão humano a partículas inaláveis na Amazônia, há um aumento significativo de danos ao DNA e morte celular, elucidando mecanismos de desenvolvimento do câncer de pulmão mediado por aerossóis de queimadas e incêndios florestais.

Os problemas de cunho social enfrentados pelas regiões aumentam a vulnerabilidade dessas populações frente esse problema ambiental, visto que as localidades mais afetadas pelas queimadas possuem pouca infraestrutura hospitalar de alta complexidade e de serviços de atenção básica. Para esses habitantes há dificuldades no acesso aos serviços, com destaque para a porção ocidental da Amazônia, o arco do desmatamento (no sudeste do Pará e norte do Mato Grosso) e todo o bioma pantanal (FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ, 2020).

Por mais que efeitos adversos na saúde sejam relatados pela literatura, pouca atenção a qualidade do ar é dada pelas esferas governamentais da região Amazônica, quando comparada ao sul e sudeste do Brasil. Estados como Paraná, Rio grande do Sul, Espírito Santo e principalmente São Paulo e Rio de Janeiro possuem as maiores coberturas de estações de monitoramento de qualidade do ar, além disso, também são os que disponibilizam à população, informações mais completas e atualizadas sobre a exposição por meio da divulgação regular de relatórios anuais, dados em tempo real e boletins diários. Da região Amazônica e Centro-Oeste, apenas o Acre, a partir de 2013, se destaca em termos área monitorada e publicidade de informações (VORMITTAG *et al.*, 2021).

O nosso indicador é baseado em dados modelados, o que viabiliza a sua produção e reprodução. No entanto, a negligência em gerar e divulgar publicamente informações relacionadas a poluição do ar, como foi discutido no parágrafo anterior para ambas regiões e partindo do entendimento de que a

produção deste indicador envolve a demanda de profissionais que tenham conhecimento técnico para processar com agilidade banco de dados, podem se tornar desafios para que seu uso seja implementado em serviços de vigilância ambiental em saúde.

O indicador combina nível e tempo de exposição e na literatura alguns poucos trabalhos realizados no Brasil utilizaram indicadores similares para investigar a associação entre poluição do ar e desfechos de saúde na região amazônica. A porcentagem anual de horas com concentrações críticas de $MP_{2,5}$ ($>80\mu g/m^3$) utilizado por Silva *et al.* (2010) e Ignotti *et al.* (2010b), assim como a porcentagem anual de horas com concentrações de $MP_{2,5}$ acima de $25\mu g/m^3$ utilizado por Nunes, Ignotti e Hacon (2013), foram associados a internações por agravos respiratórios e cardiovasculares em grupos suscetíveis. Esses achados sugerem a possibilidade de utilização do nosso indicador em novos estudos epidemiológicos.

A principal limitação desse indicador é a qualidade dos dados utilizados, que por se basearem em modelos, não são tão precisos quanto o monitoramento a nível de superfície. A ausência de uma efetiva rede de monitores de qualidade do ar em pontos estratégicos da Amazônia e Centro-Oeste, dificulta saber o quão fidedigno é o indicador e se outros métodos de interpolação, como o *Kriging*, teria uma melhor performance para realizar as estimativas. Além disso, é importante lembrar que para os últimos dois anos da série (2018-2019) foi utilizado um conjunto de dados oriundo de uma modelagem distinta dos demais anos, desse modo não sabemos até que ponto a diferença nos modelos pode ter influenciado as estimativas dos percentuais produzidos. Também é importante destacar que por mais que partículas finas ($MP_{2,5}$) sejam um dos principais poluentes emitidos por queimadas e incêndios florestais, as concentrações estimadas pelos modelos CAMS não fazem distinção quanto a fonte de emissão, que também podem ser de origem industrial e veicular.

Por fim, o indicador tem potencial de ser utilizado nos serviços de vigilância ambiental em saúde, entretanto demanda um conhecimento técnico para o processamento dos dados e elaboração das análises.

4.1 Recomendações

- A utilização desse novo indicador em estudos epidemiológicos, a fim verificar sua relação com desfechos de saúde;
- A sua aplicação em sistemas de vigilância em saúde ambiental e na formulação de melhores políticas/planos de monitoramento para o controle de queimadas e incêndios florestais.

5. CONCLUSÃO

O indicador proposto é reprodutível e apropriado para evidenciar tempo de exposição a má qualidade do ar. Nosso estudo evidenciou que mais de 20 milhões de habitantes foram expostos anualmente por longos períodos a concentrações diárias inadequadas de MP_{2,5} decorrentes de queimadas e incêndios florestais na região Amazônica e Centro-Oeste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, A.; RODRIGUES, L.; CASTRO, I. **Amazônia em chamas**: o que queima - e onde: nota técnica nº 5. Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, ago., 2020. Disponível em: <https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2020/08/NT5-pt-final.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.

ALENCAR *et al.* **Amazônia em chamas**: o fogo e o desmatamento em 2019 e o que vem em 2020: nota técnica nº 3. Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, abr., 2020. Disponível em: <https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2020/04/NT3-Fogo-em-2019.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2021.

ALENCAR *et al.* **Amazônia em Chamas**: onde está o fogo: nota técnica nº 2. Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2019. Disponível em: <https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2019/09/NT-Fogo-Amazo%CC%82nia-Fundia%CC%81ria-2019.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2020.

ALVES *et al.* Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Nature-Scientific Reports**, v.7, n.10937, 2017.

BOND; W.J; KEANE, R. Fires, ecological effects of. **Scientific Journal (JRNL)**, 2017.

CARMO, C. N.; ALVES, M. B.; HACON, S. S. Impact of biomass burning and weather conditions on children's health in a city of Western Amazon region. **Air Qual Atmos Health**, v. 6, p. 517–525, 2013.

CARMO, C. N.; HACON, S.; LONGO, K. M.; FREITAS, S.; IGNOTTI, E.; LEON, A. P.; ARTAXO, P. Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 27, n. 1, p. 10-16, 2010.

CARVALHO, N. S. *et al.* Spatio-temporal variation in dry season determines the Amazonian fire calendar. **Environ. Res. Lett.**, v.16, 2021.

CASTRO, F. R.; BASTOS, D. M. R. F.; MENDES, M.; LUANA, S.; NUNES, J. L. S. Impactos das queimadas sobre a saúde da população humana na Amazônia maranhense. **Revista de Pesquisa em Saúde**, v. 17, n. 3, p. 141-146, set./dez. 2016. Disponível em: <http://www.periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/revistahuufma/article/view/5400/4328>. Acesso em: 13 abr. 2020.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2020**. 2020, 152p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2021/05/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2020.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2022.

DELAZERI, L. M. Determinantes do desmatamento nos municípios do arco verde – Amazônia Legal: uma abordagem econométrica. **Economia-Ensaios**, Uberlândia, v. 30, n.2, p.11-34, jan./jun., 2016.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; DIAS, M. A. F. S.; DIAS, P. L. S. Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul. **Estudos Avançados**, v.19, n. 53, p. 167-185, 2005.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ). **Covid-19 e queimadas na Amazônia Legal e no Pantanal**: aspectos cumulativos e vulnerabilidades. Nota técnica. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz, nov., 2020. Disponível em: https://portal.fiocruz.br/sites/portal.fiocruz.br/files/documentos/nota_queimadascovid_nov2020.pdf. Acesso em: 19 nov. 2021.

HUMAN RIGHTS WATCH (HRW); INSTITUTO DE ESTUDOS PARA POLÍTICAS DE SAÚDE (IEPS); INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM). **O ar é insuportável**: os impactos das queimadas associadas ao desmatamento da Amazônia brasileira na saúde. 2020, 58p. Disponível em: https://www.hrw.org/sites/default/files/media_2020/08/brazil0820pt_web.pdf. Acesso em: 20 jun. 2020.

IGNOTTI, E.; HACON, S.S.; JUNGER, W.L.; MOURÃO, D.; LONGO, K.; FREITAS, S.; ARTAXO, P.; LEÃO, A. C. M. P. Air pollution and hospital

admissions for respiratory diseases in the subequatorial Amazon: a time series approach. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 26, n. 4, p. 747-761, 2010a.

IGNOTTI, E.; VALENTE, J. G.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; HACON, S. D.; ARTAXO NETTO, P. Impact on human health of particulate matter emitted from burnings in the Brazilian Amazon region. **Revista Saúde de Publica**, v. 44, n. 1, p. 121-130, 2010b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Áreas territoriais**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 17 dez. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas da população**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>. Acesso em: 17 dez. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Prodes (Desmatamento)**. 2021. Disponível em: http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/increments. Acesso em: 19 de set. 2021.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). **O arco do desmatamento e suas flechas**. 2019, 9p. Disponível em: https://www.socioambiental.org/sites/blog.socioambiental.org/files/nsa/arquivos/o_novo_arco_do_desmatamento.pdf. Acesso em: 21 ago. 2020.

JACOBSON, L. S. V.; HACON, S. S.; CASTRO, H. A.; IGNOTTI, E.; ARTAXO, P.; LEON, A. C. M. P. Acute effects of particulate matter and black carbon from seasonal fires on peak expiratory flow of schoolchildren in the Brazilian Amazon. **PLOS ONE**, v. 9, ago., 2014.

JACOBSON, L. S. V.; HACON, S. S.; CASTRO, H. A.; IGNOTTI, E.; ARTAXO, P.; SALDIVA, P. H. N.; LEON, A. C. M. P. Association between fine particulate matter and the peak expiratory flow of School children in the Brazilian subequatorial Amazon: a panel study. **Environmental Research**, v. 117, p. 27 – 35, 2012.

MACHIN, A. B.; NASCIMENTO, L. F. C. Efeitos da exposição a poluentes do ar na saúde das crianças de Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 34, n. 3, p 1-9, 2018.

MACHIN, A. B.; NASCIMENTO, L.F.; MANTOVANI, K.; MACHIN, E.B. 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, n. 2, 2019.

MAPBIOMAS. **As cicatrizes deixadas pelo fogo no território brasileiro (Coleção 1)**. Ago, 2021, 10p. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Fact_Sheet.pdf. Acesso em: 12 de out. 2021.

MATOS, N. M.; MATRICARDI, E. A. T.; LEAL, F. A. Modelo probabilístico espacial de áreas queimadas no bioma Pantanal. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 7., 2018, Jardim-MS, **Anais** [...]. Jardim-MS: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2018. p. 91-100. Disponível em: <https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/Anais-Geopantanal/pdfs/p13.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2021.

MENEZES, R. A. M.; PAVANITTO, D. R.; NASCIMENTO, L. F. C. Exposição a poluentes do ar e doença respiratória em meninos e meninas. **Revista Paulista de Pediatria**, v. 37, n. 2, p. 166-172, 2019.

MOUTINHO *et al.* **Amazônia em chamas**: desmatamento e fogo em tempos de Covid-19: nota técnica nº 4. Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, jun., 2020. Disponível em: <https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2020/06/NT4-pt-desmate-fogo-covid-1.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2021.

MURARA, P. Técnicas de interpolação para a pesquisa em climatologia regional e agroclimatologia. **Revista Brasileira de Climatologia**, jun., 2019.

NASCIMENTO, G. C.; SENNA, M. C. A. A Influência de eventos El Niño e La Niña na avaliação dos riscos de ocorrência de incêndios no Pará. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v.43, n.4, p. 189-201, 2020.

NEPSTAD, D. *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. **Science**, v. 344, 2014.

NUNES, K. V. R.; IGNOTTI, E.; HACON, S. S. Circulatory disease mortality rates in the elderly and exposure to PM2.5 generated by biomass burning in the Brazilian Amazon in 2005. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 3, p. 589-598, mar, 2013.

OLIVEIRA, B. F. A.; IGNOTTI, E.; ARTARXO, P.; SALDIVA, P. H. N.; JUNGER, W. L.; HACON, S. Risk assessment of PM2.5 to child residents in Brazilian Amazon region with biofuel production. **Environmental Health**, v. 11, n. 64, 2012.

PEREIRA, B. B.; LIMONGI, J. E. Epidemiologia de desfechos na saúde humana relacionados à poluição atmosférica no Brasil: uma revisão sistemática. **Cad. Saúde Colet.**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 91-100, 2015.

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

SANTANA *et al.* Influence of air pollutants on pneumonia hospitalizations among children in a town in the Brazilian Legal Amazon region: a time series study. **Sao Paulo Med J.**, v.138, n.2, p.126-132, 2020.

SANTOS, U. P. *et al.* Poluição do ar ambiental: efeitos respiratórios. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 47, n. 1, 2021.

SILVA, A. M. C.; MATTOS, I. E.; IGNOTTI, E.; HACON, S. S. Material particulado originário de queimadas e doenças respiratórias. **Revista de Saúde Pública**, v. 47, n. 2, p. 345-352, 2013.

SILVA *et al.* Low birth weight at term and the presence of fine particulate matter and carbon monoxide in the Brazilian Amazon: a population-based retrospective cohort study. **BMC Pregnancy and Childbirth**, v.14, n.309, 2014.

SILVA *et al.* Material particulado (PM2.5) de queima de biomassa e doenças respiratórias no sul da Amazônia brasileira. **Rev Bras Epidemiol**, v. 13, n.2, p. 337-351, 2010.

SILVÉRIO *et al.* **Amazônia em chamas**: nota técnica nº1. Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, ago., 2019. 9p. Disponível em: https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2019/08/NotaTe%CC%81cnica_AmazoniaemChamas-pt.pdf Acesso em: 11 abr. 2020.

VASCONCELOS *et al.* Suscetibilidade da vegetação ao fogo no sul do Amazonas sob condições meteorológicas atípicas durante a seca de 2005. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n.2, p.134-144, 2015.

VIGANÓ *et al.* Incêndios no Pantanal de Corumbá, MS: modelagem e previsão a partir das técnicas de análise multivariada. **Rev. Ambient. Água**, Taubaté-SP, v. 13, n. 5, 2018.

VORMITTAG, E. M. P. A. A. *et al.* Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 35, n.102, p. 7-30, 2021.

WHO (World Health Organization). **WHO global air quality guidelines**: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021, 16p. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433-eng.pdf> Acesso em: 20 de out. 2021.

WMO (World Meteorological Organization). **State of the global climate 2020**. 2020, 56p. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate> Acesso em: 15 de nov. 2021.

YE *et al.* Risk and burden of hospital admissions associated with wildfire-related PM_{2.5} in Brazil, 2000-15: a nationwide time-series study. **The Lancet Planet Health**, v.5, n.9, p. e599-607, 2021.

CAPÍTULO II:
MORBIMORTALIDADE POR DOENÇAS CARDIOPULMONARES
ATRIBUÍVEL À POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA POR QUEIMADAS E
INCÊNCIOS FLORESTAIS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

RESUMO

OLIVEIRA, Igor Neves de. **Morbimortalidade por doenças cardiopulmonares atribuível à poluição atmosférica por queimadas e incêndios florestais na Amazônia brasileira**. Cáceres: UNEMAT, 2022. 92 p. (Dissertação - Mestrado em Ciências Ambientais) ¹.

Neste estudo foi estimada a morbimortalidade por doenças cardiopulmonares atribuível à exposição ao material particulado fino (MP_{2,5}), derivado de queimadas e incêndios florestais, em sete municípios localizados na região Amazônica brasileira, entre os anos de 2010 e 2019. Dados de MP_{2,5}, de internações e óbitos por doenças cardiopulmonares e de óbitos por câncer de pulmão foram obtidos, respectivamente, do Sistema de Informações Ambientais Integrado a Saúde (SISAM) do Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE) e do Sistema de Informações Hospitalares (SIH) e Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM) do Ministério da Saúde. As frações atribuíveis de internações cardiopulmonares foram estimadas a partir de um procedimento em três estágios: no primeiro foram calculadas funções exposição-resposta específicas de cada local, no segundo as funções foram combinadas por meio de uma meta-análise e no terceiro, utilizando a função combinada, foram estimados o número e a fração das internações atribuíveis. Para as estimativas de mortalidade atribuível seguiu-se a orientação metodológica da Organização Mundial de Saúde. Atribuiu-se à exposição, 1348 internações (1,1%), 3642 (12%) óbitos, ambos por doenças cardiopulmonares e 321 (17%) óbitos por câncer de pulmão. Porto Velho-RO teve as maiores frações atribuíveis para os três desfechos selecionados. Devido a elevadas concentrações de MP_{2,5} provenientes de queimadas e incêndios florestais, conclui-se que municípios da região Amazônica possuem maiores estimativas de frações atribuíveis para desfechos de hospitalizações e óbitos por doenças cardíacas e pulmonares, quando comparadas a localidades da região sudeste onde a exposição a esse tipo de poluente é mais moderada.

Palavras-chave: material particulado fino, queimadas, incêndios florestais, impacto na saúde, carga de doença.

¹ Orientadora: Eliane Ignotti, UNEMAT

ABSTRACT

OLIVEIRA, Igor Neves de. **Morbidity and mortality from cardiopulmonary diseases attributable to atmospheric pollution from forest fires and fires in the Brazilian Amazon**. Cáceres: UNEMAT, 2022. 92 p. (Dissertation - Master in Environmental Sciences) ¹.

This study estimated morbidity and mortality from cardiopulmonary diseases attributable to exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}), derived from forest fires and fires, in seven municipalities located in the Brazilian Amazon region, between 2010 and 2019. The PM_{2.5} data, of hospitalizations and deaths from cardiopulmonary diseases and deaths from lung cancer were obtained, respectively, from the Brazil's Health-Integrated Environmental Information System (SISAM) of the National Institute for Special Research (INPE) and from the Hospital Information System (SIH) and Mortality Information System (SIM) of the Ministry of Health. Attributable fractions of cardiopulmonary admissions were estimated using a three-stage procedure: in the first, exposure-response functions specific to each location were calculated, in the second, the functions were combined through a meta-analysis, and in the third, using the function combined, the number and fraction of attributable hospitalizations were estimated. For estimates of attributable mortality, the methodological guidelines of the World Health Organization were followed. 1348 hospitalizations (1.1%), 3642 (12%) deaths, both from cardiopulmonary diseases and 321 (17%) deaths from lung cancer were attributed to exposure. Porto Velho-RO had the highest attributable fractions for the three selected outcomes. Due to high concentrations of PM_{2.5} from forest fires and fires, it is concluded that municipalities in the Amazon region have higher estimates of attributable fractions for outcomes of hospitalizations and deaths from heart and lung diseases, when compared to locations in the Southeast region where the exposure to this type of pollutant is more moderate.

Keywords: fine particle, fires, forest fires, health impact, disease burden.

¹ Major Professor: Eliane Ignotti, UNEMAT

1. INTRODUÇÃO

Globalmente, eventos de queimadas e incêndios florestais estão mais frequentes, afetando a saúde de milhões de habitantes (WHO, 2021). Diante da tendência crescente da crise climática apontada pelo IPPC (2021), esses eventos poderão piorar ainda mais em número e intensidade nos próximos anos.

No Brasil, municípios Amazônicos incluídos nos biomas Cerrado e Amazônia são os mais afetados (MAPBIOMAS, 2021). A área reconhecida como arco do desmatamento, abriga localidades responsáveis pela parte mais antropizada da Amazônia brasileira (ISA, 2019) e que apresentam os maiores registros de focos de calor na região (CARVALHO *et al.*, 2021). Entre todos os biomas brasileiros, o Cerrado e a Floresta Amazônica detêm 85% de toda área queimada no Brasil nos últimos 30 anos (MAPBIOMAS, 2021).

Durante os anos com elevado número de focos de calor por queimadas e/ou incêndios florestais foram observados aumentos de morbidades, sobretudo por doenças que afetam o aparelho respiratório (BARCELLOS *et al.* 2019). Na região Amazônica, o fogo pode contribuir com mais de 80% nas concentrações de aerossóis finos (MP_{2,5}) emitidos para a atmosfera em períodos de seca (BUTT *et al.*, 2020), alcançando níveis diários extremamente elevados e danosos a saúde (HRW; IEPS; IPAM, 2020; Capítulo I).

Estudos nessa região demonstram que exposições a concentrações aumentadas de MP_{2,5} elevam os riscos de internações hospitalares, atendimentos ambulatoriais e mortes por doenças cardíacas e pulmonares (CARMO *et al.*, 2010; IGNOTTI *et al.*, 2010a, 2010b; CARMO; ALVES; HACON, 2013; NUNES; IGNOTTI; HACON, 2013; SILVA *et al.*, 2013; SANTANA *et al.*, 2020). No entanto, a maioria dos estudos informam efeitos baseados em medidas de associação, como risco relativo (RR) que embora aponte relação causal, oferece informações limitadas sobre o impacto da exposição na saúde (GASPARRINI; LEONE, 2014).

A quantificação da morbimortalidade associadas à exposição aos poluentes do ar por meio de estimativas do número de fração atribuível, pode ser um guia importante para os formuladores de políticas, pois indica a

magnitude do problema de uma forma mais didática e fornece uma perspectiva do nível de esforço necessário que uma determinada cidade ou região precisa dispor para implementar estratégias de controle (OSTRO, 2004). As estimativas de doenças atribuíveis são ferramentas que possuem carácter mais informativo às populações sujeitas a exposição e podem ser utilizados por secretarias de saúde na elaboração de estruturas mais adequadas para receber grupos de maior vulnerabilidade (crianças, idosos, gestantes e portadores de doenças crônicas) e todos os outros que também sentem as consequências dos produtos emitidos pelo fogo.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi estimar o número e a fração da morbimortalidade por doenças cardiopulmonares atribuíveis à exposição de curto e longo prazo ao $MP_{2,5}$, em cidades da região Amazônica brasileira no arco do desmatamento, entre os anos de 2010 e 2019. Medidas de riscos para hospitalizações e óbitos são proporcionais ao nível de exposição, por isso, como hipótese deste trabalho, temos que a exposição a maiores concentrações de $MP_{2,5}$ gera maiores frações atribuíveis.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do estudo

O estudo incluiu municípios localizados na região conhecida como arco do desmatamento da Amazônia brasileira. Foram selecionados os seguintes municípios: Alta Floresta-MT, Altamira-PA, Araguaína-TO, Cruzeiro do Sul-AC, Porto Velho-RO e Rio Branco-AC. Embora Cuiabá-MT faça parte da região Amazônica, não está localizada no arco do desmatamento, no entanto, foi incluída no estudo devido apresentar exposição média ao $MP_{2,5}$ similar aos dos municípios do arco do desmatamento, isto por que a fumaça produzida por queimadas na Amazônia é carregada para o rumo oeste do continente e ao se chocar contra a cordilheira dos Andes migra para o sul e sudeste através de corredores de exportação que concentram muitas partículas sobre região centro-sul de Mato grosso, onde se localiza a capital desse estado. De acordo com

estimativas atuais, no conjunto, essas cidades possuem um total de mais de 2 milhões de habitantes (IBGE, 2021).

Estas cidades foram selecionadas por terem maiores densidades populacionais e rede hospitalar de referência regional, o que as configura como os principais polos de internação nas suas respectivas regiões. A área de estudo está apresentada na Figura 1.

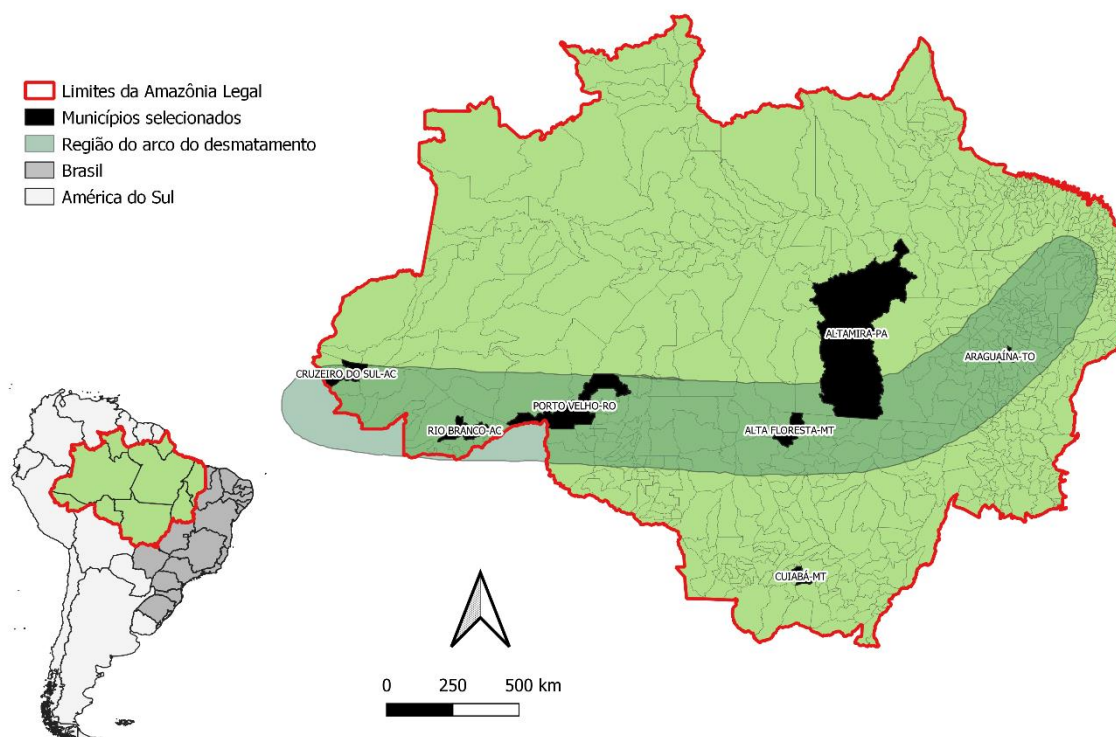


Figura 1 - Área de estudo: região Amazônica e arco do desmatamento. Fonte: elaborado a partir de malhas do IBGE (Malha Municipal Digital da Divisão Político-Administrativa Brasileira, 2020).

2.2 Dados de morbimortalidade e poluição atmosférica

Foram utilizados dados de internação hospitalar e mortalidade, disponibilizados respectivamente pelo Sistema de Informações Hospitalares (SIH) e Sistema de Informação sobre Mortalidade (SIM), ambos do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (SUS) (DATASUS). Foram selecionados dados de morbimortalidade por doenças cardiopulmonares

classificadas no capítulo IX (códigos I00-I99) e X (códigos J00 a J99), da 10^a Revisão da Classificação Internacional de Doenças (CID-10), e por câncer de pulmão, código C34 do capítulo II. Além disso, foram incluídos para mortalidade, apenas dados de pessoas com idade maior ou igual a 30 anos. Os dados foram obtidos por meio da biblioteca Microdatasus do programa R versão 4.1.1.

Foram obtidos os dados de $MP_{2,5}$ estimados pelos modelos CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service: CAMS-Reanalysis*), entre 2010-2017, e CAMS-*Nrealtime*, entre 2018-2019, do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF*) e fornecidas pelo Sistema de Informações Ambientais Integrado a Saúde (SISAM). Os dados possuem resolução espacial de 0,125 graus (aproximadamente 12,5 km). Também foram utilizados dados de temperatura e umidade específica do ar obtidos do modelo ERA5-Land do ECMWF, com resolução espacial de 9 km.

2.3 Análise estatística

2.3.1 Morbidade por doenças cardiopulmonares atribuíveis a exposição de curto prazo

Na primeira análise foram estimadas as internações por doenças cardiopulmonares atribuíveis a exposição aguda ao $MP_{2,5}$. A estimativa foi obtida a partir de um procedimento em três estágios: primeiramente foram calculadas as funções exposição-resposta específicas de cada local por meio da análise de séries temporais, que no segundo estágio foram combinadas por meio de uma meta-análise, para obtenção de uma função exposição resposta média para a região. No terceiro estágio, utilizando essa função exposição resposta combinada, foram estimados o número e a fração das internações atribuíveis à exposição ao $MP_{2,5}$.

2.3.1.1 Primeiro estágio: cálculo da função exposição-resposta por município

A relação entre as concentrações diárias de $MP_{2,5}$ e o número diário de internações por doenças cardiopulmonares em cada município foi investigada utilizando um desenho de estudo do tipo case-crossover estratificado no tempo. Esse desenho de estudo é um subtipo dos estudos de caso-controle e podem ser usados para estimar o efeito agudo de exposições ambientais. Como os controles são os próprios casos em diferentes momentos do tempo, fatores de confusão que não variam no tempo, ou que pouco variam, como sexo, idade, cor/raça, fatores comportamentais etc., são ajustadas pelo próprio desenho (JAAKKOLA, 2003; NITTA *et al.*, 2010). Além disso, a abordagem adotada para a seleção dos controles, no mesmo dia da semana, mês e ano dos casos, possibilita o ajuste de outros fatores de confusão com o dia da semana, a sazonalidade e a tendência de longo prazo (JANES *et al.*, 2005). De acordo com essa estratégia, para cada período caso foram selecionados quatro ou cinco controles, dependendo da data de hospitalização.

As associações exposição-resposta para cada cidade foram estimadas utilizando modelos de regressão de Poisson condicionais (ARMSTRONG; GASPARRINI; TOBIAS, 2014) combinados com modelos não lineares de defasagem distribuída (DLNM) (GASPARRINI; ARMSTRONG; KENWARD, 2010). Os DLNM são uma abordagem que permitem representar os efeitos não lineares e defasados de exposições ambientais. Os modelos foram ajustados para os potenciais confundidores tempo-variantes: temperatura média, umidade específica média do ar e feriados nacionais.

Para a concentração diária de $MP_{2,5}$ foi utilizada uma base cruzada composta de uma função linear para representar o efeito do preditor e para o efeito defasado foi utilizado uma *spline* cúbica natural, com três nós igualmente espaçados em sua escala logarítmica, e período máximo de defasagem de 15 dias. Para a temperatura, foi utilizada uma *spline* cúbica natural com três nós igualmente espaçados ao longo do preditor e uma *spline* cúbica natural para o período de defasagem de 10 dias com três nós igualmente espaçados na sua escala logarítmica. A umidade específica média do ar foi ajustada por meio de uma *spline* cúbica natural com 3 graus de liberdade, e foi incluída uma variável

indicadora dos feriados nacionais. A escolha do tipo de função *spline* e a alocação dos nós foram baseados nos critérios de informação de Akaike (AIC).

As curvas de exposição-resposta, os riscos relativos associados ao aumento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ e os respectivos intervalos de 95% de confiança foram gerados para cada cidade. Todas as análises foram realizadas no programa R, versão 4.1.1, por meio dos pacotes *dlnm* e *gnm*.

2.3.1.2 Segundo estágio: obtenção de uma curva exposição-resposta média para a região

Os resultados foram combinados para as sete cidades por meio de uma meta-análise (GASPARRINI; ARMSTRONG, 2013). Neste método, os coeficientes lineares, acumulados ao longo do período de defasagem e obtidos no primeiro estágio, foram combinados e foi gerada uma curva exposição-resposta e estimado o risco relativo associado ao aumento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ representativo da região. Essa estimativa foi calculada utilizando o pacote *mvmeta* do programa R, versão 4.1.1.

2.3.1.3 Estimativa das interações atribuíveis à exposição ao $\text{MP}_{2,5}$

Para estimar o número e a fração de interações atribuíveis à exposição ao $\text{MP}_{2,5}$, foi utilizado o coeficiente combinado por ser a estimativa mais estável da relação exposição-resposta para a região do arco do desmatamento, segundo Gasparrini e Leone (2014). Este coeficiente foi aplicado na fórmula abaixo para calcular o número de eventos atribuíveis em cada dia da série de estudo:

$$N_a = N_d * (1 - e^{-\beta x})$$

Onde: N_a é o número diário de interações atribuível à exposição; N_d é o número total de interações em um dia da série; β é o coeficiente obtido na meta-análise, e x é o nível da exposição nesse dia da série. O número total de interações atribuíveis à exposição ao $\text{MP}_{2,5}$ foi obtido pelas somas dos números atribuíveis diários e a fração percentual foi calculada pela razão entre o número

atribuível total e o número total de internações. Os intervalos de confiança foram calculados utilizando simulações de Monte Carlo.

2.3.2 Mortalidade atribuível à exposição de longo prazo ao MP_{2,5}

Foram estimadas as frações da mortalidade por doenças cardiopulmonares e por câncer de pulmão segundo a metodologia para a quantificação da carga de hospitalizações e óbitos atribuíveis a poluição atmosférica descrita por Ostro (2004) e publicado pela Organização Mundial de Saúde. O guia usa como referência os riscos relativos da exposição de longo prazo definidos no estudo de coorte realizado por Pope *et al.* (2002).

Neste método as frações são calculadas para cada ano da série de estudo. O procedimento utilizado para a estimação está descrito de forma resumida na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Descrição do cálculo da fração de mortes por doenças cardiorrespiratórias e câncer de pulmão atribuíveis a exposição ao MP_{2,5}, entre os anos de 2010-2019 na região Amazônia brasileira.

Desfechos	Faixa etária	Valor β e intervalos de confiança	Equação do Risco Relativo (RR)	Cálculo da Fração Atribuível Populacional (FAP)
Mortes por Doenças Cardiopulmonares	> 30 anos	0.15515 (0.0562 - 0.2541) (POPE <i>et al.</i> , 2002)	$RR = [(X+1)/(X_0+1)]^\beta$ (OSTRO, 2004)	$FA = \frac{RR - 1}{RR}$ (OSTRO, 2004)
Mortes por Câncer de Pulmão	> 30 anos	0.23218 (0.08563 - 0.37873) (POPE <i>et al.</i> , 2002)	$RR = [(X+1)/(X_0+1)]^\beta$ (OSTRO, 2004)	

Fonte: Pope *et al.*, 2002; Ostro, 2004.

Onde X é a concentração média anual observada do MP_{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); X_0 é a concentração limiar ($7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$); RR é o risco relativo à exposição média do ano; e FA é a fração atribuível.

Para estimar o número de mortes atribuíveis à exposição ao MP_{2,5}, os valores de FA foram aplicados na equação abaixo, também recomendada por Ostro (2004):

$$E = FA \times B \times P$$

Onde E é número esperado de mortes para o desfecho; B é a taxa de mortalidade por 1.000 habitantes acima de 30 anos, para o desfecho; e P é o tamanho total da população acima de 30 anos exposta.

3. RESULTADOS

Na Tabela 2 são apresentadas para as sete cidades selecionadas, as estimativas da população total e acima de 30 anos.

Tabela 2 – Densidade populacional dos municípios localizados na região do arco do desmatamento da região Amazônica brasileira: estimativas para população total e acima de 30 anos, no ano de 2020.

MUNICÍPIO	População Total	População acima dos 30 anos
Alta Floresta - MT	51.946	28.506
Altamira - PA	115.969	54.195
Araguaína – TO	183.381	89.276
Cruzeiro do Sul - AC	89.072	36.213
Cuiabá - MT	617.848	347.663
Porto Velho - RO	539.354	271.192
Rio Branco - AC	413.418	191.527

Fonte: Ministério da Saúde/SVS/DASNT/CGIAE

As maiores médias diárias de hospitalizações por agravos cardiopulmonares ocorreram em Cuiabá-MT e Porto Velho-RO, com valores de 11,4 e 7,23 respectivamente (Tabelas 3). Para a mortalidade cardiopulmonar, médias acima de 1,0 óbito por dia ficaram restritas a Cuiabá-MT, Porto Velho-RO e Rio Branco-AC. Nenhum município selecionado apresentou média igual ou superior a 1,0 óbito por dia para o câncer pulmonar.

Porto Velho-RO registrou as maiores exposições médias diárias ao $MP_{2,5}$, com máxima acima de $1.000\mu g/m^3$. As medidas de temperatura e umidade específica do ar sugerem homogeneidade das características climáticas que predominam nos diferentes pontos do arco do desmatamento. Para temperatura, as médias e máximas diárias foram verificadas entre uma curta variação de 25 a $27^{\circ}C$ e 30 a $32^{\circ}C$, respectivamente, enquanto para a umidade específica, as médias e máximas foram representadas pelos mesmos valores.

Tabela 3 - Estatística descritiva das médias diárias de internação e mortalidade por doenças cardiorrespiratórias, mortalidade por câncer de pulmão, MP_{2,5}, temperatura e umidade específica do ar para municípios localizados na região do arco do desmatamento da região Amazônica brasileira, entre 2010-2019.

MUNICÍPIO	Internação Cardiopulmonar		Mortalidade Cardiopulmonar (> 30 anos)		Mortalidade por Câncer de Pulmão (> 30 anos)		MP _{2,5} (µg/m³)							TEMPERATURA (°C)			UMIDADE ESPECÍFICA (q)		
	Média	Desvio Padrão (SD)	Média	Desvio Padrão (SD)	Média	Desvio Padrão (SD)	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão (SD)	P 25°	P 50° Mediana	P 75°	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
Alta Floresta - MT	1,31	1,31	0,25	0,51	0,01	0,07	15,99	0,40	420,20	22,15	7,08	10,31	16,03	25,26	18,50	29,40	0,01	0,01	0,02
Altamira - PA	5,67	4,34	0,49	0,71	0,02	0,13	17,29	1,78	423,88	17,51	9,00	12,60	18,60	26,39	22,90	30,80	0,01	0,01	0,02
Araguaína – TO	4,38	2,44	0,84	0,92	0,04	0,20	16,63	0,00	358,75	17,47	8,20	12,69	18,93	26,64	22,80	31,50	0,01	0,01	0,02
Cruzeiro do Sul - AC	1,75	1,74	0,35	0,60	0,01	0,12	14,16	0,95	468,40	21,59	7,25	10,18	14,43	26,12	22,00	31,10	0,01	0,00	0,02
Cuiabá - MT	11,14	4,78	3,17	1,85	0,19	0,44	16,65	0,00	644,35	26,78	7,40	10,70	16,75	25,86	13,19	32,29	0,01	0,00	0,02
Porto Velho - RO	7,23	3,40	1,77	1,35	0,12	0,35	29,82	1,80	1.136,53	61,99	9,70	13,60	22,46	26,02	18,22	30,57	0,01	0,01	0,02
Rio Branco - AC	3,09	2,10	1,61	1,32	0,12	0,35	18,51	0,25	539,00	30,54	7,85	11,10	16,88	25,27	15,23	30,68	0,01	0,00	0,02

Fonte: DATASUS/SUS, SISAM e Era5-Land

Na Tabela 4 estão apresentados os riscos de internação e os respectivos intervalos de 95% de confiança para cada aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração diária de $\text{MP}_{2,5}$, específicos de cada cidade e para a região, bem como os números e frações atribuíveis à exposição de curto prazo. As curvas exposição-resposta específicas e combinadas estão apresentadas na Figura suplementar 1 em anexos. É possível observar aumentos pequenos no risco relativo (embora não significativas) na maioria dos locais e na estimativa combinada. Entretanto, cerca de 1.348 (48-2.683) internações por doenças cardiopulmonares foram atribuídas à exposição ao $\text{MP}_{2,5}$ nos municípios da região o que equivale a 1,1% (0 – 2,1%) do total de internações pelo mesmo desfecho.

Tabela 4 - Estimativas dos riscos relativos de internações por doenças cardiopulmonares a cada aumento de 10 mg/m^3 de $\text{MP}_{2,5}$, e do número e fração das internações atribuíveis ao poluente na região Amazônica do Arco do Desmatamento, de 2010 a 2019.

MUNICÍPIO	Risco Relativo (RR)			Fração Atribuível (FA)					
	RR	IC 95%		Nº	IC 95%		%	IC 95%	
Alta Floresta - MT	0,98	0,94	1,01	44	4	87	0,9	0,1	1,8
Altamira PA	1,04	1,00	1,07	196	14	389	0,9	0,1	1,9
Araguaína - TO	1,01	0,97	1,05	145	0	281	0,9	0	1,8
Cruzeiro do sul - AC	1,01	0,97	1,06	49	0	96	0,8	0	1,5
Cuiabá - MT	1,01	1,00	1,02	385	3	769	0,9	0	1,9
Porto Velho - RO	1,00	1,00	1,01	408	27	813	1,5	0,1	3,1
Rio Branco AC	1,01	0,99	1,04	121	0	248	1,1	0	2,2
GERAL – Arco do desmatamento	1,01	1,00	1,01	1.348	48	2.683	1,1	0	2,1

Os números de óbitos por doenças cardiopulmonares e câncer de pulmão e as respectivas frações atribuíveis à exposição de longo prazo ao $\text{MP}_{2,5}$ estão apresentados na Tabela 5. Assim como para internações, Porto Velho-RO teve as maiores frações atribuíveis, foram 17% (7-27%) para mortes por

problemas cardiovasculares e 25% (10-37%) para câncer de pulmão. No total, foram 3.642 (1.381-5.698) mortes totais para doenças cardiopulmonares e 321 (127-488) para câncer de pulmão, que representaram cargas percentuais de 12 (4-18%) e 17% (7-26%), atribuíveis à exposição ao MP_{2,5}.

Tabela 5 - Estimativas das frações atribuíveis populacionais de mortes por doenças cardiopulmonares e câncer de pulmão à exposição ao MP_{2,5} na região Amazônica (Arco do desmatamento), de 2010 a 2019.

MUNICÍPIO	Fração Atribuível Populacional (FA) - 2010-2019											
	Mortalidade por Doenças Cardiopulmonares (> 30 anos)						Mortalidade por Câncer de pulmão (> 30 anos)					
	Nº	IC 95%		%	IC 95%		Nº	IC 95%		%	IC 95%	
Alta Floresta - MT	89	33	140	10	4	15	3	1	4	16	5	21
Altamira - PA	194	73	306	11	4	17	10	4	15	16	6	24
Araguaína - TO	320	120	506	10	4	17	23	9	35	16	6	24
Cruzeiro do Sul - AC	104	39	165	8	3	13	7	3	11	13	6	21
Cuiabá - MT	1.148	432	1.809	10	4	16	99	38	152	14	5	22
Porto Velho - RO	1.113	429	1.713	17	7	27	111	45	166	25	10	37
Rio Branco - AC	674	255	1.059	11	4	18	68	27	105	16	6	25
TOTAL	3.642	1.381	5.698	12	4	18	321	127	488	17	7	26

Nº: número atribuível

%: fração atribuível

4. DISCUSSÃO

Neste estudo, estimamos a morbimortalidade atribuível a exposição ao poluente MP_{2,5}, derivado de queimadas e incêndios florestais para as sete maiores cidades da região do arco do desmatamento, durante os anos de 2010 e 2019. Foram 1.348 internações por doenças cardiopulmonares atribuídas à exposição de curto prazo ao MP_{2,5}, equivalente a 1,1% do total de internações pela mesma causa; 3.642 óbitos por doenças cardiopulmonares, 12% do total, e 321 óbitos por câncer de pulmão, ou 17% foram atribuídos à exposição de longo

prazo ao MP_{2,5}. São internações e óbitos que poderiam ser evitados ou reduzidos com a eliminação e atenuação da exposição ao poluente.

Quando relacionada a internações por doenças cardiopulmonares causadas pela exposição e seus efeitos agudos, é importante destacar aqui as maiores FAs para a mortalidade desse mesmo desfecho devido à exposição crônica. Conforme discutido por Ostro (2004), esse tipo de efeito geralmente apresenta FAs maiores que os agudos.

Em um estudo que incluiu somente municípios do bioma Amazônia, Sant'Ana e Rocha (2020) atribuíram 2.195 hospitalizações por doenças respiratórias no ano de 2019, com um excesso de custo entre 1 a 5 milhões de reais ao SUS. Os maiores números atribuíveis e custos decorrentes foram verificados nos meses de seca, indicando o severo impacto socioeconômico que queimadas e incêndios florestais causam nesta época e região. Para mortalidade, Butt *et al.* (2020) encontraram para toda Bacia Amazônica um excesso de 4.300 mortes por todas as doenças não transmissíveis e por infecções nas vias respiratórias inferiores durante o ano de 2012, e para todo o ano de 2019, um total de 3.400 óbitos (BUTT *et al.*, 2021).

Segundo de Butt *et al.* (2020), incêndios na vegetação aumentam consideravelmente as concentrações regionais de MP_{2,5} na parte oeste da Amazônia e por isso municípios dos estados de Rondônia, Acre e Mato Grosso são os que apresentam frações mais elevadas de morbidades não transmissíveis e nas vias respiratórias. Isso corrobora com nossos achados, sobretudo para Porto Velho-RO que teve as maiores exposições e, conseqüentemente, as maiores atribuições.

Um recente estudo sobre o impacto do MP_{2,5} derivado de queimadas e incêndios florestais sobre internações hospitalares para uma série de 15 anos (2000-2015), foi realizado nas cinco regiões do Brasil, onde foi verificado e discutido que as maiores FAs por internações totais, agravos respiratórios e cardiovasculares, ocorreram no Norte e Centro-Oeste do Brasil (86% e 1,04%, respectivamente) devido as maiores concentrações médias de MP_{2,5}, influenciadas pelas fontes de incêndio da região Amazônica (Ye *et al.*, 2021). Esses resultados indicam que as frações encontradas neste estudo para

internações por agravos cardiopulmonares nos municípios Amazônicos, podem estar entre as maiores para esse conjunto de desfecho, quando comparados a municípios da região sudeste do Brasil (0,53%), onde a poluição do ar é caracterizada principalmente por emissões veiculares e industriais.

Agravos na saúde atribuíveis à exposição às partículas finas derivadas do fogo na Amazônia possuem alcance não só regional, mas também continental, e embora a sua contenção seja complexa, a redução de determinadas práticas de manejo e uso do solo são apontadas como os melhores caminhos para que políticas de proteção à saúde e controle de queimadas sejam formuladas para a região (REDDINGTON *et al.*, 2015; BUTT *et al.*, 2020, 2021). Reddington *et al.* (2015) mostraram que a redução de 40% no desmatamento e consequentemente da exposição ao $MP_{2,5}$ derivado exclusivamente de incêndios por desmatamento na Amazônia boliviana e do sudoeste do Brasil, entre 2001 e 2012, evitou por ano 1.060 mortes adultas por doenças cardiopulmonares e por câncer de pulmão em toda América do Sul.

Causas específicas de morbimortalidade cardiopulmonar representam boa parte das frações de mortes e internações aqui encontrados para esse conjunto de desfechos. Isso por que segundo Nawaz e Henze (2019) os resultados de saúde que mais contribuíram com o total de óbitos atribuíveis à queimadas e incêndios florestais ($MP_{2,5}$) em todo o Brasil, entre 2016-2019, foram doenças isquêmicas do coração em 32% e doenças respiratórias inferiores agudas em 23%.

Um estudo revelou que a exposição a partículas finas está vinculada a mudanças na estrutura do coração, particularmente a uma maior dilatação ventricular, são sinais de estresse ao coração e que precedem o desenvolvimento de insuficiência cardíaca (AUNG *et al.*, 2018). Outro trabalho já demonstrou que o $MP_{2,5}$ proveniente de incêndios florestais são prejudiciais para agravos respiratórios do tipo crônico, como a asma, mesmo em concentrações equivalentes à de dias sem queima de biomassa florestal (KISER *et al.*, 2020). De acordo com Alves *et al.* (2017), um dos mecanismos que explicam o câncer de pulmão mediado pela exposição a queimadas na Amazônia, decorre do aumento significativo de danos ao DNA e morte celular nos pulmões gerada pela

ação oxidava e inflamatória provocada pelo hidrocarboneto (HPA) retero, presente nas partículas inaláveis.

A ausência de significância estatística das medidas de associação pode ser explicada pela qualidade dos dados de exposição e dos desfechos. Medidas modeladas como as fornecidas pelo CAMS/SISAM apresentam concentrações de $MP_{2,5}$ superestimadas (MORI *et al.*, 2021), além disso é importante ressaltar que esses modelos não são exclusivos para emissões de queimadas e incêndios florestais, já as internações utilizadas não representam os números totais de casos, visto que entradas em instituições privadas não são incluídas no sistema do SUS. Também é interessante destacar que as cidades selecionadas possuem baixa densidade populacional. Fatores como esses podem diminuir o poder estatístico e dificultar a captação de causalidade entre os dados, pelos modelos utilizados.

Outra limitação de nosso estudo refere-se à estimação dos óbitos atribuíveis à exposição de longo prazo utilizando coeficientes secundários para as relações exposição-resposta. Embora o material utilizado seja produto da OMS, os coeficientes sugeridos representam o impacto na saúde de uma população com características socioeconômicas e padrões de mortalidade, vulnerabilidade e exposição (incluindo composição química do poluente) diferentes das aqui analisadas.

4.1 Recomendações

- Que seja constituída uma rede de monitoramento da qualidade do ar para além das grandes metrópoles brasileiras;
- Que sejam realizados estudos com o uso de dados obtidos por meio de uma rede de monitoramento da qualidade do ar na região Amazônica para fins comparativos com os resultados ora apresentados e que consolidação desta rede seja o início de uma nova perspectiva de vigilância ambiental nos estados da Amazônia Legal;
- Que a disseminação de informações relativas à exposição, desfechos, riscos relativos e frações atribuíveis sejam de fácil acesso a gestores e população em geral. Acordos entre o Ministério da Saúde e veículos de imprensa

como rádios e TVs, poderiam ser um dos caminhos para que informações como essas ganhem mais destaque e importância que merecem. Outro meio de divulgação e talvez o mais ideal, seria por meio do próprio Ministério da Saúde através dos trabalhos desenvolvidos pelo seu Programa de Vigilância em Saúde de Populações Expostas à Poluição Atmosférica – o VIGIAR.

5. CONCLUSÃO

Os municípios da região Amazônica, sobretudo aqueles localizados no arco do desmatamento cuja exposição ao material particulado fino derivado de queimadas e incêndios florestais é muito acima do recomendado pela OMS, são mais impactados na saúde humana, com maiores frações atribuíveis para desfechos de hospitalizações e óbitos por doenças cardíacas e pulmonares, quando comparados às áreas metropolitanas da região sudeste, cuja exposição é moderada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES *et al.* Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Nature-Scientific Reports**, v.7, n.10937, 2017.

ARMSTRONG, B. G.; GASPARRINI, A.; TOBIAS, A. Conditional Poisson models: A flexible alternative to conditional logistic case cross-over analysis. **BMC Medical Research Methodology**, v. 14, n. 1, p. 1–6, 2014.

AUNG, N. *et al.* Association between ambient air pollution and cardiac morpho-functional phenotypes. **Circulation**, v.138, p.2175-2186, nov., 2018.

BARCELLOS *et al.* **Queimadas na Amazônia e seus impactos na saúde**: a incidência de doenças respiratórias no sul da Amazônia aumentou significativamente nos últimos meses, 3º Informe técnico do Observatório de Clima e Saúde. FIOCRUZ (Fundação Oswaldo Cruz), set. 2019. 15p. Disponível em:

https://climaesaude.iciet.fiocruz.br/sites/climaesaude.iciet.fiocruz.br/files/informe_observatorio_queimadas.pdf Acesso em: 10 abr. 2020

BUTT, E. W. *et al.* Large air quality and human health impacts due to Amazon forest and vegetation fires. **Environ Res Commun.**, 2020.

BUTT, E. W. *et al.* Large air quality and public health impacts due to Amazonian deforestation fires in 2019. **GeoHealth**, v. 5, 2021.

CARMO, C. N.; ALVES, M. B.; HACON, S. S. Impact of biomass burning and weather conditions on children's health in a city of Western Amazon region. **Air Qual Atmos Health**, v. 6, p. 517–525, 2013.

CARMO, C. N.; HACON, S.; LONGO, K. M.; FREITAS, S.; IGNOTTI, E.; LEON, A. P.; ARTAXO, P. Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 27, n. 1, p. 10-16, 2010.

CARVALHO, N. S. *et al.* Spatio-temporal variation in dry season determines the Amazonian fire calendar. **Environ. Res. Lett.**, v.16, 2021.

GASPARRINI, A.; ARMSTRONG, B. Reducing and meta-analysing estimates from distributed lag non-linear models. **BMC Medical Research Methodology**, v. 13, n. 1, p. 1, 9 dez. 2013.

GASPARRINI, A.; ARMSTRONG, B.; KENWARD, M. G. Distributed lag non-linear models. **Statistics in Medicine**, v. 29, n. 21, p. 2224–2234, 20 set. 2010.

GASPARRINI, A.; LEONE, M. Attributable risk from distributed lag models. **BMC Medical Research Methodology**, v. 14, n. 1, p. 55, 23 dez. 2014.

HUMAN RIGHTS WATCH (HRW); INSTITUTO DE ESTUDOS PARA POLÍTICAS DE SAÚDE (IEPS); INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM). **O ar é insuportável**: os impactos das queimadas associadas ao desmatamento da Amazônia brasileira na saúde. 2020, 58p. Disponível em: https://www.hrw.org/sites/default/files/media_2020/08/brazil0820pt_web.pdf. Acesso em: 20 jun. 2020.

IGNOTTI, E.; HACON, S.S.; JUNGER, W.L.; MOURÃO, D.; LONGO, K.; FREITAS, S.; ARTAXO, P.; LEÃO, A. C. M. P. Air pollution and hospital admissions for respiratory diseases in the subequatorial Amazon: a time series approach. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 26, n. 4, p. 747-761, 2010a.

IGNOTTI, E.; VALENTE, J. G.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; HACON, S. D.; ARTAXO NETTO, P. Impact on human health of particulate matter emitted from burnings in the Brazilian Amazon region. **Revista Saúde de Publica**, v. 44, n. 1, p. 121-130, 2010b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas populacionais**. 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 17 dez. 2021.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). **O arco do desmatamento e suas flechas**. 2019, 9p. Disponível em:

https://www.socioambiental.org/sites/blog.socioambiental.org/files/nsa/arquivos/o_novo_arco_do_desmatamento.pdf. Acesso em: 21 ago. 2020.

IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **AR6 climate change 2021: the physical Science basis**. 2021, 3949p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 13 jan. 2022.

JAAKKOLA, J. J. K. Case-crossover design in air pollution epidemiology. **The European respiratory journal. Supplement**, v. 40, n. 40, p. 81s-85s, 2003.

JANES, H.; SHEPPARD, L.; LUMLEY, T. Case Crossover Analyses of Air Pollution Exposure Data: referent selection strategies and their implications for bias. **Epidemiology**, v. 16, n. 6, p. 717–726, 2005.

KISER *et al.* Particulate matter and emergency visits for asthma: a time-series study of their association in the presence and absence of wildfire smoke in Reno, Nevada, 2013–2018. **Environmental Health**, v.19, n.92, 2020.

MAPBIOMAS. **As cicatrizes deixadas pelo fogo no território brasileiro (Coleção 1)**. Ago, 2021, 10p. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Fact_Sheet.pdf. Acesso em: 12 de out. 2021.

MORI, J. *et al.* **Engolindo fumaça**: além das mudanças climáticas: efeitos da fumaça na saúde da população amazônica brasileira durante a pandemia de covid-19. 2021, 22p. Disponível em: <https://infoamazonia.org/project/engolindo-fumaca/>. Acesso em: 14 mar. 2022.

NAWAZ, M. O.; HENZE, D. K. Premature deaths in Brazil associated with long-term exposure to PM 2.5 from Amazon fires between 2016-2019. **GeoHealth**, 2020.

NITTA, H. *et al.* An introduction to epidemiologic and statistical methods useful in environmental epidemiology. **Journal of epidemiology / Japan Epidemiological Association**, v. 20, n. 3, p. 177–184, 2010.

NUNES, K. V. R.; IGNOTTI, E.; HACON, S. S. Circulatory disease mortality rates in the elderly and exposure to PM2.5 generated by biomass burning in the Brazilian Amazon in 2005. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 3, p. 589-598, mar, 2013.

OSTRO, B. **Outdoor air pollution**: assessing the environmental burden of disease at national and local levels. Environmental Burden of Diseases Series, n. 5. World health Organization. 2004.

POPE, C. A. *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. **Journal of the American Medical Association**, v.287, n.9, p.1132-1141, mar., 2002.

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

SANTANA *et al.* Influence of air pollutants on pneumonia hospitalizations among children in a town in the Brazilian Legal Amazon region: a time series study. **Sao Paulo Med J.**, v.138, n.2, p.126-132, 2020.

SANT'ANNA, A. A.; ROCHA, R. **Impactos dos incêndios relacionados ao desmatamento na Amazônia brasileira sobre saúde**. Nota Técnica n.11. IEPS: São Paulo, 2020. Disponível em: https://www.hrw.org/sites/default/files/media_2020/08/Health%20Impacts%20of%20Deforestation-Related%20Fires%20in%20the%20Amazon_PT_1.pdf. Acesso em: 18 dez. 2021.

SILVA, A. M. C.; MATTOS, I. E.; IGNOTTI, E.; HACON, S. S. Material particulado originário de queimadas e doenças respiratórias. **Revista de Saúde Pública**, v. 47, n. 2, p. 345-352, 2013.

WHO (World Health Organization). **Checklists to assess vulnerabilities in health care facilities in the context of climate change**. 2021, 108p. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/checklists-vulnerabilities-health-care-facilities-climate-change>. Acesso em: 12 jan. 2022.

YE *et al.* Risk and burden of hospital admissions associated with wildfire-related PM_{2.5} in Brazil, 2000-15: a nationwide time-series study. **The Lancet Planet Health**, v.5, n.9, p. e599-607, 2021.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou caracterizar para a região Centro-Norte do Brasil, o tempo de exposição a má qualidade do ar decorrente da emissão de partículas finas (MP_{2,5}) por queimadas e incêndios florestais e quantificar o seu impacto na saúde cardiopulmonar. Para cumprir os objetivos, o estudo elaborou um indicador do tempo de exposição a concentrações inadequadas de MP_{2,5} e produziu estimativas dos números e frações de hospitalizações e óbitos por doenças cardiopulmonares atribuíveis a esse mesmo poluente.

O indicador do tempo de exposição demonstrou que mais de 20 milhões de habitantes da região Amazônica e Centro-Oeste foram submetidos a longos períodos com concentrações diárias de MP_{2,5} inadequadas a saúde humana,

sobretudo nos dias da estação seca. Por meio das frações atribuíveis foi possível verificar que uma parcela de internações e óbitos por doenças cardíacas e pulmonares poderiam ter sido evitadas ou reduzidas com a eliminação e atenuação da exposição ao MP_{2,5}, sobretudo em municípios que sofrem com os maiores níveis de exposição diariamente.

Os objetivos deste trabalho foram cumpridos e as principais hipóteses levantadas foram aceitas. Os resultados encontrados trouxeram novas possibilidades de pesquisas futuras. O indicador proposto poderá ser utilizado em diversos meios, como em estudos que envolvam a associação com desfechos de saúde, ou também na aplicação em sistemas de vigilância em saúde ambiental e na formulação de ações para o controle de queimadas e incêndios florestais. Outro trabalho que poderá complementar os achados desta dissertação é a produção de frações atribuíveis para as regiões, utilizando dados de exposição observados a nível de superfície e/ou adotando a metodologia da OMS com a aplicação de coeficientes secundários adequados para a exposição de partículas finas emitidas por essa fonte de poluição (queimas e incêndios florestais).

Os achados deste estudo demonstram que a exposição aos poluentes emitidos por queimadas e incêndios florestais na região Centro-Norte do Brasil, geram prejuízos à saúde que merecem ser olhados com mais atenção, sobretudo pelos poderes governamentais dos estados, municípios e do âmbito federal. Que os resultados encontrados possam instiga-los a priorizar esforços políticos, com recursos e ações que visem reduzir os longos períodos de exposição à concentrações inadequadas de poluentes atmosféricos, a começar por uma melhor estrutura de diagnóstico da poluição do ar nessas regiões, o que contribuirá para a tomada das melhores medidas de proteção à saúde dos habitantes da Amazônia e Centro-Oeste.

- **Ao Poder Público Federal recomenda-se:**

Viabilizar o avanço na criação de itens de curto e médio prazo previstos pelo Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR) que não foram desenvolvidos e implementados. Dentre os itens de curto prazo se destacam o apoio à formulação de Programas Estaduais de Controle de Poluição

do Ar, com capacitação técnica, laboratorial e de recursos humanos. De médio prazo estão a implementação da uma rede nacional de monitoramento da qualidade do ar (com a ampliação da vigilância na Amazônia e Centro-Oeste) e a produção do inventário nacional de fontes e emissões.

Para que a gestão da qualidade do ar seja repassada aos governos estaduais por meio dos Programas Estaduais, é necessário também que a esfera federal estabeleça prazos peremptórios para que os estados implementem os padrões de qualidade do ar, pois atualmente a Resolução nº 491 de 19/11/2018 não define datas para que as metas intermediárias apresentadas pela mesma sejam alcançadas; em todo o Brasil isso foi feito apenas no estado de São Paulo (Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013) por meio da CETESB, órgão que é referência em gestão de qualidade do ar no Brasil. Além disso, é necessário que esses prazos sejam definidos seguindo os padrões atualizados pela OMS (2021), já que a resolução segue os padrões de 2005. Outra recomendação para uma possível revisão do poder público federal se refere ao Índice de Qualidade do Ar (IQA); embora a resolução nº 491 ofereça o cálculo (que se adequa a todo tipo de poluente) e define faixas de concentração recomendadas como “Boa”, de “Atenção”, “Alerta” e “Emergência”, não define a que tipo de população se enquadra tais recomendações (como por exemplo: população geral, crianças, idosos ou portadores de doenças cardiopulmonares) muito menos complementa o Índice de Qualidade do Ar com faixas que podem ser classificadas como “Moderadas” e “Ruim”, como faz a CETESB.

- **Ao Poder Público Estadual recomenda-se:**

Integrar e combinar as ações das secretarias estaduais de saúde e meio ambiente no Programa Estadual de Controle de Poluição do Ar. No caso dos estados pertencentes a Amazônia e Centro-Oeste, para que possa ser implementado um melhor sistema de vigilância e prevenção de danos à saúde causados por episódios críticos de má qualidade do ar, recomenda-se o desenvolvimento de um sistema de previsão e alerta sobre a qualidade do ar com informações repassadas a regiões e/ou municípios com base no cruzamento de dados sobre a concentração de poluentes, direção e velocidade do vento. Recomenda-se também a disponibilização à população, de

informações sobre a exposição no estado por meio da divulgação regular e atualizada de relatórios, dados em tempo real e boletins diários. Também cabe ao estado dispor de um bom sistema de monitoramento, prevenção e controle de focos de calor.

- **Ao Poder Público Municipal recomenda-se:**

Aos gestores de saúde adotarem medidas básicas para prevenir e mitigar o impacto da poluição do ar, como: emitir alertas com recomendações à populações de risco para que permaneçam dentro de casa, para que reduzam a atividade física ou até mesmo que usem máscaras e medicações preventivas; e também, interromper atividades em comércios, escolas e criar abrigos de emergência.

ANEXOS

Anexo 1 - Curvas de exposição-resposta para municípios Amazônicos.

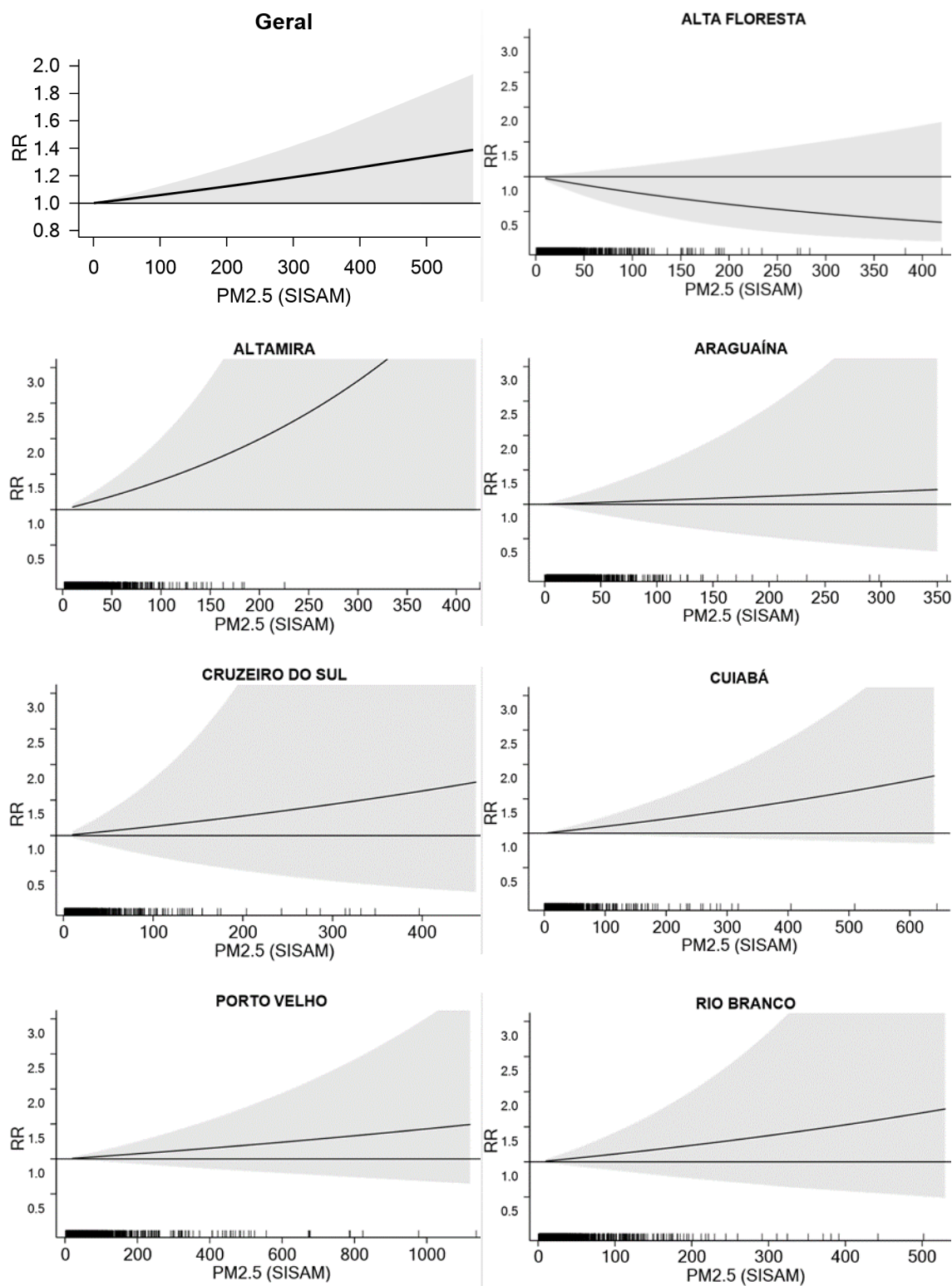


Figura Suplementar 1 - Curvas exposição-resposta específicas de cada município e combinadas. Onde o eixo Y corresponde aos Riscos Relativos (RR) e as regiões acinzentadas seus respectivos intervalos de confiança, já o eixo X corresponde aos níveis de exposição ao $MP_{2,5}$.