



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

MAURÍCIO DO NASCIMENTO MOURA

AERROSSÓIS DE QUEIMADAS
E INTERNAÇÕES HOSPITALARES POR DOENÇAS RESPIRATÓRIAS
EM CRIANÇAS NO ESTADO DO PARÁ

BELÉM - PA
2021

MAURÍCIO DO NASCIMENTO MOURA

**AEROSSÓIS DE QUEIMADAS
E INTERNAÇÕES HOSPITALARES POR DOENÇAS RESPIRATÓRIAS
EM CRIANÇAS NO ESTADO DO PARÁ**

Tese de Doutorado submetida como requisito à aprovação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA Amazônia Oriental como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e Dinâmica socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Interação clima, sociedade e ambiente

Orientadora: Dra. Maria Isabel Vitorino

Coorientador: Dr. Glauber Guimarães Cirino da Silva

BELÉM - PA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M929a Moura, Maurício do Nascimento.
Aerossóis de queimadas e internações hospitalares por
doenças respiratórias em crianças no Estado do Pará / Maurício
do Nascimento Moura. — 2021.
124 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Maria Isabel Vitorino Vitorino
Coorientador(a): Prof. Dr. Glauber Guimarães Cirino da Silva
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto
de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais, Belém, 2021.

1. Aerossóis. 2. Saúde. 3. Queimadas. 4. Clima. 5. Amazônia. I.
Título.

CDD 551.5113

MAURÍCIO DO NASCIMENTO MOURA

**AEROSSÓIS DE QUEIMADAS
E INTERNAÇÕES HOSPITALARES POR DOENÇAS RESPIRATÓRIAS
EM CRIANÇAS NO ESTADO DO PARÁ**

Tese de Doutorado submetida como requisito à aprovação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA Amazônia Oriental como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Ciências Ambientais.

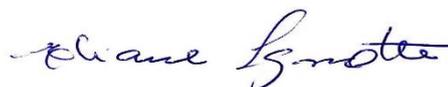
Área de Concentração: Clima e Dinâmica socioambiental na Amazônia
Linha de pesquisa: Interação clima, sociedade e ambiente

Belém, 31 de maio de 2021.

Banca examinadora:



Maria Isabel Vitorino - Orientadora
Doutora em Meteorologia
Universidade Federal do Pará - UFPA



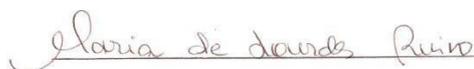
Eliane Ignotti – Membro externo
Doutora em Saúde Pública
Universidade do Estado do Mato Grosso - UNEMAT



Rafael da Silva Palácios – Membro
Doutor em Física Ambiental
Universidade Federal do Pará - UFPA



Edson José Paulino Rocha – Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará - UFPA



Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo – Membro
Doutora em Agronomia
Museu Paraense Emílio Goeld - MPEG

Ao eterno carinho, eterno abraço, eterno ouvido, eterno amor.

Maria de Fátima, minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por mais uma oportunidade de realizar um sonho, fruto de muito trabalho e dedicação.

Agradeço à Universidade Federal do Pará, a qual devo minha completa formação (graduação, mestrado e doutorado). Tenho muito orgulho de levar o nome desta instituição de ensino e pesquisa: grande, plural, diversa e que a tantos anos forma profissionais na Amazônia.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos pelo período de quatro anos. Sem esses recursos, não seria possível a realização desta pesquisa.

À professora Isabel Vitorino pela terceira orientação consecutiva e por sempre acreditar no meu potencial. Penso que o aprendizado não para por aqui, pois nos seguirá ao longo de nossas carreiras profissionais.

Ao meu coorientador Glauber Cirino pelas horas dedicadas ao meu aprendizado e por me dar apoio em minhas notáveis deficiências. Todo esse apoio serviu ainda mais para aumentar a certeza de que ainda há muito a se aprender.

Estendo meus agradecimentos ao professor Valdir Filho pela recepção na Universidade do Estado do Amazonas (UEA), atenção e valiosas sugestões na construção de um dos capítulos deste trabalho.

À Ana Torres, servidora pública da Secretaria de Saúde do Pará (SESPA) por ter me recebido diversas vezes e me auxiliado no manuseio dos sistemas TABNET e TABWIN do DATASUS.

Agradeço a minha família pelos momentos de amor e afeto, os quais serviram como combustível para eu chegar até aqui e que sempre tentei ao máximo corresponder, em especial, minha tia Conceição Moura e meu primo Max Alan Moura que no momento mais difícil me estendeu a mão. Momento decisivo para o término deste trabalho.

A minha avó, Deusimar Teixeira Moura (*in memoriam*), que incessantemente em suas orações nunca deixou de me apresentar, vibrando com minhas conquistas e recebendo-me com sorrisos festivos em todas as minhas chegadas. Tudo na vida é passageiro, mas meu amor por você é eterno.

Não poderia deixar de agradecer aos meus queridos amigos e amigas, Vania Franco, Rodrigo Rafael, Giordani Rafael, Ilale Lima, Mateus Rebelo, Douglas Ferreira e

Augusto Gabriel, os quais nunca me negaram ajuda, de qualquer natureza, nos momentos de maior dificuldade. Conceder ajuda é uma atitude nobre e precisar de ajuda é uma necessidade humana, por esse motivo não se faz pesquisa sozinho e não se alcança o sucesso sem o amparo da mão amiga.

Ao instituto de geociências, ao PPGCA e à FAMET por conceder-me toda a infraestrutura necessária para a realização desta pesquisa, sete dias por semana.

À biblioteca do Instituto de Geociências da UFPA, Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão, pelo auxílio na normatização da ABNT.

A minha turma de doutorado (2016) pelos momentos de parceria ao longo das disciplinas e na confecção dos projetos científicos.

Aos renomados pesquisadores, membros desta banca examinadora, pela presença e valiosas sugestões.

“A deficiência na educação nos atrasou na história. A falta de educação produz vidas menos iluminadas, trabalhadores menos produtivos e um número limitado de pessoas capazes de pensar criativamente. A educação, mais que tudo, não pode ser capturada pela mediocridade e por visões pré-iluministas. Precisamos armar as pessoas com educação, cultura e ciência”

Luís Roberto Barroso, Supremo Tribunal Federal

RESUMO

Segundo a OMS, a cada quatro mortes de crianças abaixo de 5 anos, uma está relacionada à poluição do meio ambiente, o que equivale a 93% de crianças vivendo em ambientes com atmosfera poluída em todo o mundo. Esta pesquisa investigou a variabilidade das queimadas e das internações hospitalares por doenças respiratórias em crianças menores de 9 anos de idade, em uma região profundamente marcada por mudanças no uso da terra em todo o planeta, com anos consecutivos no *ranking* de desmatamento, seguido da queima da biomassa florestal: o estado do Pará. Foram analisados 18 anos de séries temporais de variáveis climáticas, PM_{2.5}, AOD e saúde para dois municípios paraenses localizados em regiões com características ambientais e sociais muito diferentes, mediante um estudo ecológico de caráter epidemiológico. Em geral, os dois locais analisados mostraram um aumento na taxa de internação no segundo semestre de cada ano da série histórica, apesar de Santarém mostrar altos números desses registros durante todo o ano. O clima também mostrou um papel importante no aumento da incidência de síndromes respiratórias, porque deixa o ambiente propício à ação do fogo, entretanto, os resultados mostraram que anos sem anomalias climáticas significativas também podem apresentar altos registros de queimadas e PM_{2.5}. Quando se analisou essas relações em apenas um ano e com recorde de queimadas, constatou-se uma combinação mais nítida entre as variáveis investigadas, com boa correlação estatística, bem como um surpreendente e preocupante aumento das queimadas no município de Santarém, chegando a superar Marabá, município que sempre esteve à frente com os maiores valores de desmatamento, queimadas e poluição do ar. Marabá percebe antecipadamente os efeitos das queimadas, em geral, dois meses antes de Santarém, sendo esta situação explicada pela localização geográfica, grau de preservação da floresta, resposta às oscilações climáticas, atividade industrial e ação de políticas públicas. Uma amostra retirada da série temporal mostrou que Marabá chega a atingir no auge da estação seca, níveis de atenção e de emergência para PM_{2.5}, apresentando assim uma baixa qualidade do ar. Santarém não registrou níveis alarmantes, porém o monitoramento diário detectou muitos dias com níveis acima do permitido, de acordo com os padrões estabelecidos pela legislação ambiental. Os níveis de poluição detectados podem elevar o número de desfechos por doenças respiratórias, sobrecarregando o sistema de saúde pública do estado.

Palavras-chave: aerossóis; saúde pública; queimadas; clima; qualidade do ar; Amazônia.

ABSTRACT

According to WHO, for every four deaths of children under 5 years, one is related to environmental pollution, which is equivalent to 93% of children living in environments with polluted atmosphere worldwide. This research investigated the variability of fires and hospital admissions for respiratory diseases in children under 9 years of age, in a region deeply marked by changes in land use across the planet, with consecutive years in the ranking of deforestation, followed by fire of forest biomass: the state of Para. Eighteen years of time series of climatic variables, $PM_{2.5}$, AOD and health were analyzed for two Para municipalities located in regions with very different environmental and social characteristics, through an ecological study of epidemiological character. In general, the two places analyzed showed an increase in the hospitalization rate in the second semester of each year of the historical series, despite Santarem showing high numbers of these records throughout the year. The climate also played an important role in increasing the incidence of respiratory syndromes, because it makes the environment conducive to fire action, however, the results showed that years without significant climatic anomalies can also present high records of fires and $PM_{2.5}$. When these relationships were analyzed in just one year and with a record of fires, a clearer combination between the investigated variables was found, with good statistical correlation, as well as a surprising and worrying increase in fires in the municipality of Santarem, even surpassing Maraba, a municipality that has always been ahead with the highest values of deforestation, fires and air pollution. Maraba perceives the effects of fires in advance, in general, two months before Santarem, and this situation is explained by the geographic location, degree of forest preservation, response to climatic fluctuations, industrial activity and public policy action. A sample taken from the time series showed that Maraba reaches, at the height of the dry season, attention and emergency levels for $PM_{2.5}$, thus presenting low air quality. Santarem did not register alarming levels, but daily monitoring detected many days with levels above the permitted level, in accordance with the standards established by environmental legislation. The levels of pollution detected can increase the number of outcomes for respiratory diseases, overloading the state's public health system.

Keywords: aerosols; public health; fires; climate; air quality; Amazon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1 - Crescimento e tendência da população mundial entre 1700 e 2100, mostrando uma possível estabilização do crescimento. O ajuste da curva logística baseia-se no conjunto de dados disponibilizados pela (UN-DESA-PD).....22
- Figura 1.2 - Mapa global de poluição por partículas finas ($PM_{2.5}$) em $\mu g m^{-3}$ estimada por satélites entre 2001-2006. Destaque para os países do norte da África e da Ásia que indicam os maiores valores de $PM_{2.5}$ em comparação aos outros continentes.....22
- Figura 1.3 - Micrografia eletrônica de varredura de partículas biogênicas primárias coletadas na bacia amazônica.....25
- Figura 1.4 - Diagrama esquemático que mostra vários mecanismos radiativos associados aos efeitos de partículas de aerossóis na atmosfera. Os pequenos pontos pretos representam as partículas de aerossol. As setas representam a radiação solar incidente e refletida, e as linhas onduladas representam a radiação emitida. Os círculos brancos preenchidos indicam a concentração do número de núcleos de condensação de nuvens (NCN).....28
- Figura 1.5 - Série temporal da concentração de massa do aerossol para $PM_{2.5}$ (em verde) e PM_{10} (em vermelho) no painel superior e BC equivalente (painel inferior) em Porto Velho (RO), entre 2009 e 2012.....31
- Figura 1.6 - Esquematização do trajeto do $PM_{2.5}$ no sistema respiratório humano, devido ao grande tempo de exposição à poluição do ar, com o possível desenvolvimento de graves doenças pulmonares e alterações genéticas que podem ser passadas para gerações futuras.....34
- Figura 2.1 – Mapa da área de estudo, com a localização geográfica do país, estado e dos municípios de Marabá e Santarém no estado do Pará.....44
- Figura 2.2 – Características ambientais do estado do Pará, com a hidrografia e a localização dos municípios de Marabá e Santarém: a) áreas totais desmatadas (amarelo) e áreas de floresta preservadas (verde) de 2000 a 2017; b) média climatológica da precipitação anual do produto CHIRPS de 1981 a 2017.....47

Figura 2.3 – Distribuição dos valores de anomalias mensais dos índices climáticos de 2000 a 2017: a) MMA (Atlântico); b) IOS (Pacífico). A linha mais suavizada representa a média móvel de 6 meses e a linha tracejada representa a dominância do sinal das fases positiva e negativa.....	48
Figura 2.4 – Distribuição dos valores das anomalias mensais de PRP, T, UR para Marabá (4A-C); PRP, T e UR para Santarém (4 D-F), ambas as séries de 2000 a 2017. As curvas tracejadas representam a dominância do sinal das fases positiva e negativa em duas décadas.....	52
Figura 2.5 – Distribuição dos valores das anomalias mensais das variáveis socioambientais para o município de Marabá no período de 2000 a 2017 (as curvas tracejadas representam a dominância do sinal das fases positivas e negativas; a linha contínua representa a média móvel de 6 meses)	53
Figura 2.6 – Idem figura 2.5, porém para Santarém.....	55
Figura 2.7 – Variabilidade dos valores mensais da profundida óptica do aerossol (AOD), a partir dos dados do MODIS para os municípios de Marabá (azul); Santarém (verde) no período de 2000 a 2017.....	58
Figura 2.8 – Correlação entre AOD e taxa de internação hospitalar em menores de 9 anos de idade por 1000 habitantes, em Marabá: a) variabilidade média do AOD (tracejado) e da taxa de internação (contínuo) durante a estação seca para cada ano da série de estudo; b) modelo de regressão linear entre AOD e taxa de internação, com p-valor < 0,05 e intervalo de confiança de 95%, para a média da estação seca de cada ano da série de estudo.....	58
Figura 2.9 – Correlação entre AOD e taxa de internação hospitalar em menores de 9 anos de idade por 1000 habitantes, em Santarém: a) variabilidade média do AOD (tracejado) e da taxa de internação (contínuo) durante a estação seca para cada ano da série de estudo; b) modelo de regressão linear entre AOD e taxa de internação, com p-valor < 0,05 e intervalo de confiança de 95%, para a média da estação seca de cada ano da série de estudo	59
Figura 2.10 – Informações estatísticas representadas por histogramas e box-plot da análise conjunta da média mensal dos focos de queimadas, AOD e internações hospitalares para Marabá e Santarém de 2000 a 2017	60

Figura 3.1 – Mapa da área de estudo com ênfase no estado do Pará, onde os municípios de Marabá e Santarém estão localizados. A imagem inclui a Amazônia legal (verde) e o arco do desmatamento(hachurado).....	71
Figura 3.2 – Registros diários de focos de queimadas florestais mediante eventos extremos de clima selecionados para o município de Marabá-PA: a) Dipolo do Atlântico; b) La Niña; c) Normal; d) El Niño.....	75
Figura 3.3 – Registros diários de focos de queimadas florestais mediante eventos extremos de clima selecionados para o município de Santarém-PA: a) Dipolo do Atlântico; b) La Niña; c) Normal; d) El Niño.....	76
Figura 3.4 – Padrões de anomalias de TSM das bacias do Atlântico e Pacífico, para a média do trimestre MAR-ABR-MAI (2005) e SET-OUT-NOV (2010, 2014, 2015) de cada evento analisado. A anomalia foi calculada em relação à climatologia de 36 anos (1981-2017). a) 2005: Dipolo do Atlântico; b) 2010: La Niña; c) 2014: Normal; d) 2015: El Niño.....	78
Figura 3.5 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) PM _{2.5} e focos de queimadas; b) PM _{2.5} e internações hospitalares por doenças respiratórias para Marabá-PA em 2005, com 84,8% e 35% de correlação, respectivamente.....	80
Figura 3.6 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) PM _{2.5} e focos de queimadas; b) PM _{2.5} e internações hospitalares por doenças respiratórias para Marabá-PA em 2010, com 96% e 53,9% de correlação, respectivamente.....	80
Figura 3.7 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) PM _{2.5} e focos de queimadas; b) PM _{2.5} e internações hospitalares por doenças respiratórias para Marabá-PA em 2014, com 51,7% e 52,6% de correlação, respectivamente.....	81
Figura 3.8 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) PM _{2.5} e focos de queimadas; b) PM _{2.5} e internações hospitalares por doenças respiratórias para Marabá-PA em 2015, com 25,4% e 36,4% de correlação, respectivamente.....	81
Figura 3.9 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) PM _{2.5} e focos de queimadas; b) PM _{2.5} e internações hospitalares por doenças respiratórias para Santarém-PA em 2005, com 86% e 44,4% de correlação, respectivamente.....	82
Figura 3.10 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) PM _{2.5} e focos de queimadas; b) PM _{2.5} e internações hospitalares por doenças respiratórias para Santarém-PA em 2010, com 78,6% e 36,3% de correlação, respectivamente.....	82

Figura 3.11 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) PM _{2.5} e focos de queimadas; b) PM _{2.5} e internações hospitalares por doenças respiratórias para Santarém-PA em 2014, com 84,1% e 34,1% de correlação, respectivamente.....	83
Figura 3.12 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) PM _{2.5} e focos de queimadas; b) PM _{2.5} e internações hospitalares por doenças respiratórias para Santarém-PA em 2015, com 96,2% e 40,5% de correlação, respectivamente.....	83
Figura 4.1 – Mapa da área de estudo com ênfase no estado do Pará, na Amazônia oriental. A imagem inclui as malhas hidroviária e rodoviária, com os municípios de Marabá e Santarém, dentro e fora do arco do desmatamento (hachurado), respectivamente.....	95
Figura 4.2 – Localização dos biomas brasileiros com maior percentual de queimadas em 2017. Em destaque, o percentual de unidades de conservação atingidas pelas queimadas florestais, com 50,4% para a Amazônia legal.....	96
Figura 4.3 – Série temporal do número de focos de queimadas em 20 anos (1998-2017) no estado do Pará, mostrando as tendências de diminuição e aumento de incêndios florestais por todo o estado, com destaque para 2017 com quase 50 mil focos registrados.....	98
Figura 4.4 – Série temporal de focos de queimadas na escala anual (2000-2017) para os municípios de Marabá e Santarém, com destaque para 2005 e 2017, onde os maiores quantitativos se invertem no final da série, mostrando maiores números em Santarém.....	99
Figura 4.5 – Acumulado de focos de queimadas referente ao ano de 2017 no estado do Pará, com ênfase na malha rodoviária e nos municípios de Marabá, no sudeste do estado e Santarém, na região do baixo Amazonas.....	101
Figura 4.6 – Variabilidade mensal do número de focos de queimadas nos municípios de Marabá e Santarém, ao longo do ano de 2017. a) focos de queimadas, b) PM _{2.5} , c) taxa de internação hospitalar por doenças respiratórias.....	102
Figura 4.7 – Variabilidade diária do PM _{2.5} durante o período de queimadas de 2017 (AGO-DEZ). O gráfico mostra o limiar diário de 60 µg/m ³ estabelecido pelo CONAMA (Resolução 491/2018), conforme o padrão de qualidade do ar intermediário (PI-1)	104

Figura 4.8 – Associação entre $PM_{2.5}$ e focos de queimadas para Marabá-PA em 2017. a) Distribuição da média diária; b) Modelo de regressão linear com 77% de correlação entre as variáveis envolvidas	106
Figura 4.9 – Associação entre $PM_{2.5}$ e focos de queimadas para Santarém-PA em 2017. a) Distribuição da média diária; b) Modelo de regressão linear com 59% de correlação entre as variáveis envolvidas.....	107
Figura 4.10 – Análise de regressão linear da média mensal entre $PM_{2.5}$ e internações hospitalares referente ao ano de 2017, com nível de confiança de 95% e $p < 0,005$. a) Marabá-PA; b) Santarém-PA.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Padrões de qualidade do ar para os principais poluentes atmosféricos recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e pela resolução N° 491 do CONAMA de 19 de novembro de 2018. PI: Padrão de qualidade do ar intermediário; PF: Padrão de qualidade do ar final estabelecido pela OMS.....	32
Tabela 2.1 - Análise estatística descritiva sazonal das variáveis estudadas para os dois municípios pesquisados, onde DP: desvio padrão; P: percentil; MAX: valor máximo; MIN: valor mínimo (2000-2017).....	57
Tabela 3.1 - Anos de ocorrência dos eventos extremos de clima selecionados para esta pesquisa, bem como suas respectivas intensidades, anomalia de precipitação e focos de queimadas registrados nos mesmos períodos. Vermelho: forte; azul: moderado; branco: normal; M: Marabá; S: Santarém.....	73
Tabela 3.2 - Resumo das análises mensais de regressão linear para os eventos selecionados nos municípios de Marabá e Santarém. R ² : coeficiente de determinação; r: coeficiente de correlação; α : significância estatística; F: focos de queimadas; I: internações hospitalares.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOD *Aerosol Optical Depth*

CAMS *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*

CEPTEC Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CETESB Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CHIRPS *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station*

CID Classificação Internacional de Doenças

CONAMA Conselho Nacional de Meio Ambiente

CPC *Climate Prediction Center*

DATASUS Departamento de Informação do Sistema Único de Saúde

DPOC Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica

ECMWF *European Centre for Medium-range Weather Forecasts*

ENOS El Niño Oscilação Sul

FIOCRUZ Fundação Oswaldo Cruz

GEE Gases de efeito estufa

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH Índice de desenvolvimento humano

INMET Instituto Nacional de Meteorologia

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IOS Índice de Desenvolvimento Humano

IPAM Instituto de Pesquisas da Amazônia

MERGE *Multi-satellite retrievals for Global Precipitation Measurement*

MERRA *Modern - Era Retrospective analysis for Research and Applications*

MMA Modo Meridional do Atlântico

MODIS *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

NCN Núcleo de Condensação de Nuvem

NOAA *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OMS Organização Mundial de Saúde

ONG Organização não Governamental

PI Padrão de qualidade do ar intermediário

PM *Particulate Material*

PPCDam Programa de políticas de comando e controle do desmatamento na Amazônia

PRODES Programa de cálculo do desmatamento da Amazônia

PRONAR Programa Nacional de Qualidade do Ar

RMB Região Metropolitana de Belém

SISAM Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde

TSM Temperatura da superfície do mar

UBS Unidade Básica de Saúde

UC Unidade de Conservação

UPA Unidade de Pronto Atendimento

UR Umidade Relativa

UTC *Universal Time Coordinated*

UTI Unidade de Terapia Intensiva

WHO *World Health Organization*

ZCIT Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL	20
1.1 Problemas ambientais em escala global	20
1.2 O efeito dos aerossóis no clima da Amazônia	22
1.3 O papel dos aerossóis no balanço de radiação na atmosfera terrestre	26
1.4 Influência dos aerossóis atmosféricos na saúde humana	30
1.5 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa	36
1.6 Objetivos	37
1.6.1 Objetivo Geral	37
1.6.2 Objetivos Específicos	37
1.7 Estrutura da Tese	38
CAPÍTULO 2 INTER-RELAÇÕES ENTRE DOENÇAS RESPIRATÓRIAS E CONDIÇÕES AMBIENTAIS: UMA ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS NA AMAZONIA ORIENTAL	39
2.1 Introdução	41
2.2 Material e Métodos	43
2.3 Resultados e Discussões	46
2.4 Conclusões	61
REFERÊNCIAS	62
CAPÍTULO 3 IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E SOCIAIS DE EXTREMOS CLIMÁTICOS NA POLUIÇÃO DO AR POR MATERIAL PARTICULADO FINO DE QUEIMADAS EM ÁREAS URBANAS NA AMAZÔNIA	67
3.1 Introdução	69
3.2 Material e Métodos	71
3.3 Resultados e Discussões	73
3.4 Conclusões	85
REFERÊNCIAS	87
CAPÍTULO 4 POLUIÇÃO POR AEROSSÓIS DE QUEIMADAS FLORESTAIS E SUAS IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE PÚBLICA NO ESTADO DO PARÁ: UM ESTUDO DE CASO	90
4.1 Introdução	92
4.2 Material e Métodos	94

4.3 Resultados e Discussão	97
4.4 Conclusões	109
REFERÊNCIAS	111
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO GERAL	115
5.1 Resultados Chaves: impactos e implicações	115
5.2 Conclusões de forma integrada	116
5.3 Prioridades para pesquisas futuras	117
5.4 Considerações Finais	117
REFERÊNCIAS	118

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Problemas ambientais em escala global

Estudos ambientais e sociais apontam que o crescimento populacional é uma das principais causas dos problemas ambientais que enfrentamos (MILLER; SPOOLMAN, 2015, p.15), pois o crescimento exponencial da população (Figura 1.1) começa lentamente, mas com o tempo atinge proporções gigantescas. Nestas proporções, as pessoas consomem enormes quantidades de energia e produzem muita poluição, inclusive a do ar.

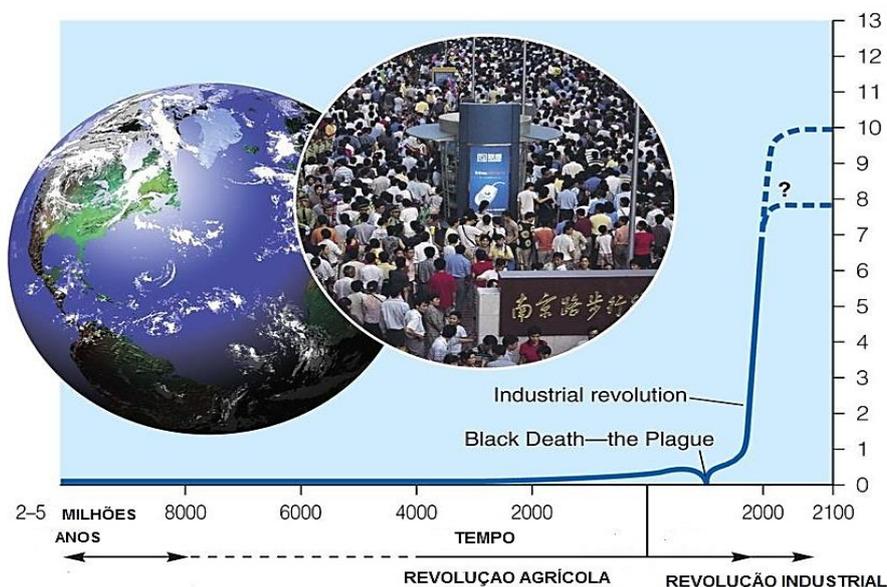
A Figura 1.1 mostra que a população humana tem crescido de forma exponencial. Coletivamente, pessoas de todo o planeta consomem grande quantidade de comida, água, energia e produzem muita poluição e resíduos nesse processo, impulsionando problemas de ordem ecológica sem precedentes, com enormes desafios para as sustentabilidades social e ambiental. Estima-se que até 2100, a população mundial atinja o patamar de 10 bilhões de habitantes (WPP, 2019). A revolução industrial trouxe modificações drásticas para os mecanismos de produção de mercadorias e para as relações de trabalho no século XVIII, com notáveis efeitos no panorama geral das áreas rural e urbana.

No passado, os avanços na agricultura foram acompanhados pelo aparecimento de novas tecnologias, o que provocou acentuadas migrações para as cidades. Essa aceleração da urbanização, no sentido mais amplo, traduz-se pela destruição de numerosos biótipos. As atividades humanas podem causar alterações drásticas no ambiente, logo, como elemento do ecossistema urbano, o homem pode sofrer as consequências diretas desta poluição, quer seja como danos as suas atividades normais ou a sua própria saúde.

Desde o início do século XX, a poluição do ar tem sido um grave problema nos centros urbanos industrializados, com a presença cada vez maior de automóveis e do crescimento da indústria química e petroquímica, considerados por muitos estudos como fontes poluidoras (SILVA JÚNIOR; ANDRADE, 2013), porém esse processo foi mais acelerado durante a II Guerra Mundial. Episódios de poluição excessiva causaram aumento do número de mortes de pessoas em algumas cidades da América e da Europa, como é o caso recente da Mongólia que obteve, em 2019, valores considerados muito acima do nível aceitável pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Regiões metropolitanas brasileiras também sofrem com um dos males do século XXI que é a poluição da atmosfera. De acordo com um estudo feito pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2019), veículos automotores são a principal fonte de gases poluentes como monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x), já os óxidos de enxofre (SO_x) são emitidos principalmente pela indústria. As partículas inaláveis recebem contribuição de outros fatores, como a suspensão de partículas do solo e a emissão de aerossóis primários e secundários emitidos por queimadas de florestas.

Figura 1.1 - Crescimento e tendência da população mundial entre 1700 e 2100, mostrando uma possível estabilização do crescimento. O ajuste da curva logística baseia-se no conjunto de dados disponibilizados pela (UN-DESA-PD).



Fonte: Adaptado de WB/UNO/L Young/Peter Arnold, 2008.

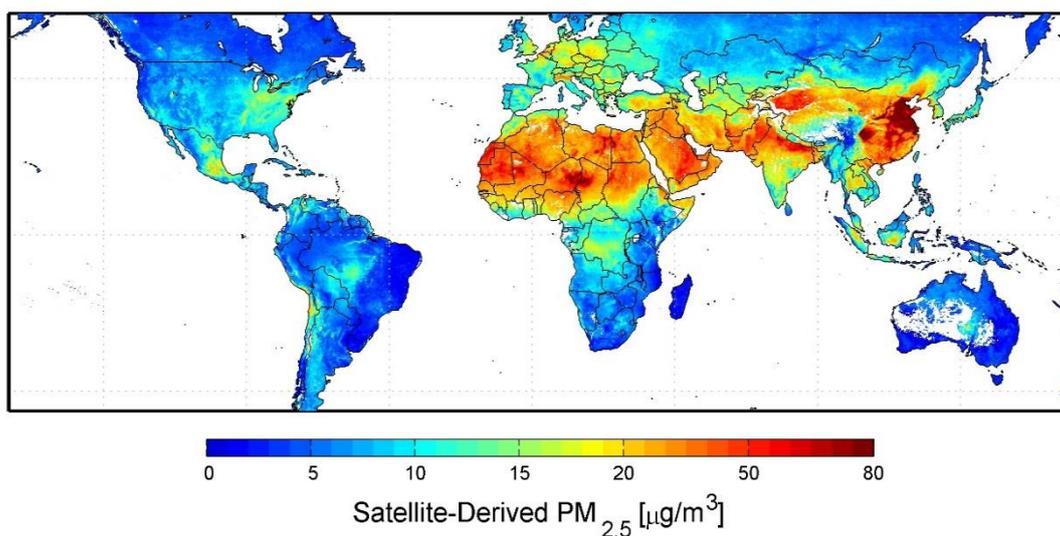
Nas últimas décadas, vários estudos têm buscado o entendimento do papel das partículas de aerossóis emitidas por queimadas da floresta amazônica, bem como no processo de formação de nuvens e no balanço de radiação da atmosfera.

O efeito das queimadas para a atmosfera, principalmente na estação seca da região amazônica, tem sido evidenciado em estudos que dão um enfoque primordial no efeito das emissões na composição química, no balanço de radiação da atmosfera e na superfície terrestre. Dentre esses estudos, destaca-se o de Freitas et al. (1997), os quais utilizando um modelo numérico de mesoescala, estudaram a trajetória de massas de ar oriundas de áreas de queimadas no Brasil central, indicando significativos indícios de

transporte de material particulado provenientes de emissões de queimadas, em várias direções do Globo terrestre. Anos mais tarde, Artaxo et al. (2002) mostraram uma variabilidade interanual da composição atmosférica na Amazônia, indicando valores de concentração de alguns gases comparáveis aos medidos em grandes centros urbanos, em diferentes períodos do ano.

A Figura 1.2 mostra como as emissões significativas de partículas de aerossóis são lançadas na atmosfera durante estas transformações com efeitos importantes para o balanço de radiação solar, formação de nuvens (FREITAS et al., 2005; POLKËR et al., 2015; SENA et al., 2013) e ecossistemas (ARTAXO, 2013; CIRINO et al., 2014; RAP et al., 2015), clima e qualidade do ar, incluindo visibilidade e saúde humana.

Figura 1.2 - Mapa global de poluição por partículas finas ($PM_{2.5}$) em $\mu g\ m^{-3}$ estimada por satélites entre 2001-2006. Destaque para os países do norte da África e da Ásia que indicam os maiores valores de $PM_{2.5}$ em comparação aos outros continentes.



Fonte: Van Donkelaar et al. (2010)

1.2 O efeito dos aerossóis no clima da Amazônia

A poluição do ar se estabelece pela presença de produtos químicos na atmosfera, em concentrações altas o suficiente para prejudicar os organismos, os ecossistemas, o clima e a saúde humana (MILLER; SPOOLMAN, 2015). Segundo Seinfeld e Spyros (2006), aerossol atmosférico consiste em partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera. Poeira e fuligem são exemplos de materiais sólidos, enquanto névoa e neblina referem-se a líquidos, este último significando uma alta concentração de

gotículas de água. Os aerossóis também podem ser classificados segundo a sua formação: aerossol primário que são emitidos já na forma de partícula na atmosfera e secundário aquele que surge quando gases dão origem ao aerossol por reações químicas no processo de conversão gás-partícula.

De acordo com a literatura, há dois tipos de poluentes. Os poluentes primários que são substâncias químicas emitidas diretamente no ar por meio de processos naturais ou de atividades humanas e os secundários que são aqueles derivados da reação química entre poluentes primários e componentes naturais do ar.

De acordo com a literatura, a maioria das partículas biogênicas encontra-se na fração grossa, enquanto que a fração fina geralmente é proveniente de emissões de queimadas florestais de origem antrópica ou não (ARTAXO et al., 2009). As queimadas liberam principalmente pequenas partículas não esféricas e pequenos aglomerados de material carbônico com grande propriedade de absorção de radiação solar comumente chamado de carbono preto ou *black carbon*, como é conhecido na literatura internacional. Conforme a pluma da queimada envelhece na atmosfera, são encontradas partículas mais esféricas, com composição mais homogênea.

De acordo com Baird e Cann (2011), o material particulado encontrado em suspensão na atmosfera não é do mesmo tamanho e formato e nem todos têm a mesma composição química. Os menores diâmetros são observados em torno de $0,002\ \mu\text{m}$, enquanto que os maiores chegam a $100\ \mu\text{m}$. Para eles, a propriedade mais importante dos aerossóis é o diâmetro que faz com que este seja classificado como grosso ou fino, obedecendo o limiar de $2,5\ \mu\text{m}$ de diâmetro. Em geral, partículas finas permanecem por mais tempo em suspensão no ar, chegando a dias ou até semanas, enquanto que as partículas grossas se assentam rapidamente em variadas superfícies.

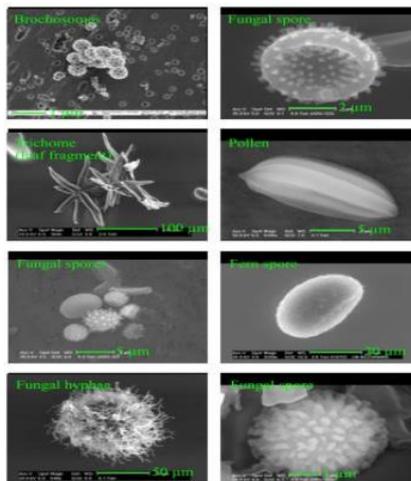
Dockery e Pope (1994) classificam partículas grossas, com diâmetro entre $2,5$ e $30\ \mu\text{m}$, as que são originadas através de combustões descontroladas, dispersão de materiais diversos na natureza e que apresentam características básicas quanto a quantidade de elementos químicos presentes em seu conteúdo, como silício, titânio, alumínio, ferro, sódio e cloro, porém pólenes e esporos também podem estar presentes na constituição das partículas grossas. Segundo Stone et al. (2003), dentro desse grupo, destaca-se o PM_{10} , formado por uma mistura de componentes particulados, de diâmetro inferior a $10\ \mu\text{m}$ (Figura 1.3) que inclui componentes derivados do tráfego de veículos e da combustão de compostos de carbono e poeiras minerais transportadas pelo vento.

Partículas finas, com diâmetro menor que 2.5 μm (Figura 1.3) e maior acidez, são derivadas da combustão de fontes móveis ou estacionárias, como incineradores e termoelétricas. Entre seus principais componentes encontram-se carbono, chumbo, vanádio, bromo, óxidos de enxofre e nitrogênio que na forma de aerossóis, constituem a maior fração das partículas finas (DOCKERY; POPE, 1994).

Na floresta amazônica, a biosfera é a principal fonte de aerossóis, tanto biogênicos primários, quanto secundários (ARTAXO et al., 2009; NASCIMENTO et al., 2021). A componente chamada biogênica está ligada à emissão da própria vegetação, portanto está sempre presente na natureza, logo consiste na emissão de pólen, esporos de fungos, restos foliares e também pela formação secundária através da oxidação atmosférica de gases traço e compostos voláteis (MARTIN, 2010).

Segundo Baird e Cann (2011), as partículas finas mais comuns de origem antropogênica incluem aquelas emitidas pela queimada, pelo uso de pneus e freios nos veículos e pela poeira da fundição de metais. A combustão incompleta de combustíveis a base de carbono, como carvão, óleo e gasolina, produz muitas partículas finas de fuligem, as quais são encontradas principalmente na forma de cristais de carbono. Enquanto as partículas grossas resultam principalmente da quebra de partículas maiores, as partículas finas são formadas principalmente pelas reações químicas entre gases e pela coagulação de espécies ainda menores, classificadas como partículas secundárias. Embora a maior parte da massa atmosférica de partículas finas origine-se de fontes naturais, aquelas sobre as áreas urbanas são originadas muitas vezes de origem antropogênica.

Figura 1.3 - Micrografia eletrônica de varredura de partículas biogênicas primárias coletadas na bacia amazônica.



Fonte: Martin (2010)

Em menor escala, a mudança no padrão do uso da terra, através de um intenso processo de ocupação humana na região amazônica (DAVIDSON; ARTAXO, 2004; NOBRE et al., 1996), ocorre com muita evidência no estado do Pará, trazendo graves consequências como o lançamento de partículas de aerossóis para a atmosfera, através das queimadas, tanto de áreas de pastagem quanto de floresta primária. Estas alterações no uso do solo são responsáveis por emissões significativas de gases traço (ARTAXO et al., 2002).

No Brasil, as principais fontes antrópicas de gases de efeito estufa e material particulado (do inglês *Particle Matter - PM*) estão relacionadas às mudanças no uso da terra, principalmente em diferentes regiões da Amazônia legal. De acordo com o Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa feito em 1994, cerca de 75% das emissões de CO₂ estão relacionados a este setor. Sabe-se que a parte predominante destas emissões tem historicamente ocorrido na região do arco do desmatamento, na Amazônia Brasileira, onde a conversão de florestas em áreas agrícolas ou de pastoreio acontece a taxas elevadas, especialmente nos estados do Pará (PA), Mato Grosso (MT), Rondônia (RO) e Maranhão (MA) (NEPSTAD et al., 1999; PROCÓPIO et al., 2004; BELL et al., 2006; ROSA et al., 2008).

Por estar localizada na região tropical, a floresta amazônica apresenta intensa atividade convectiva, portanto lança material particulado a grandes altitudes, podendo ser transportados de modo eficiente a longa distância através da circulação geral da atmosfera (ANDREAE et al., 2001) que, conseqüentemente, libera grande parte das partículas que atuam como núcleos de condensação de nuvens (NCN), efetivamente

controlando os mecanismos de formação de nuvens e precipitação (ARTAXO et al., 2003).

Um estudo feito por Freitas et al. (2000), mostrou que o transporte de material particulado a longas distâncias segue um padrão de circulação geral da atmosfera, fazendo com que as emissões da floresta amazônica cheguem a locais remotos via oceanos Atlântico e Pacífico. Andreae et al. (2001) observaram que fumaças provenientes da queima de biomassa alcançam grandes altitudes acima de 10 km na vertical e que cerca de 80 a 95% do material particulado encontrado nessa fumaça são provenientes da região amazônica por convecção profunda. Depois de alcançarem longas distâncias sobre os oceanos, retornam à América do Sul, via circulação de Hadley.

A emissão de partículas de aerossóis provenientes de queimadas de pastagens e de florestas altera de forma significativa a composição química da atmosfera amazônica, principalmente na estação seca. Durante a estação seca ocorre intensas atividades de queimadas da floresta e, conseqüentemente, forte emissão de material particulado para a atmosfera. Estudos mostram que essa emissão excessiva de aerossóis pode trazer sérias complicações a nível local e global (ANDREAE et al., 2002; GUENTHER et al., 1995).

1.3 O papel dos aerossóis no balanço de radiação na atmosfera terrestre

Balanço é a diferença entre a entrada e a saída de elementos de um sistema. A radiação solar que chega à Terra é a fonte de energia necessária para praticamente toda a vida e para os movimentos atmosféricos de nosso planeta. Quando a radiação solar atinge a atmosfera terrestre, parte dela é refletida, outras partes são espalhadas, absorvidas e transmitidas (YAMASOE; CORRÊA, 2016).

De acordo com Ramaswamy et al. (2001), a perturbação do balanço da energia incidente e da energia emergente do planeta Terra, medidas em watts/m² por um determinado período de tempo é definida como forçante radiativa. Pode ser positiva, neste caso, causa aquecimento da troposfera e da superfície da Terra. No entanto, pode ser também negativa, causando o resfriamento de ambas. A radiação solar que incide no topo da atmosfera varia basicamente com a latitude e com o tempo, isto é, a época do ano e a hora do dia. Ao entrar na atmosfera, parte da radiação solar interage com elementos em suspensão no ar, como os aerossóis (radiação difusa), outra parte atinge a superfície sem que haja interações (radiação direta), conforme mostra a Figura 1.4. Segundo Haywood e Boucher (2000), as nuvens imperturbáveis contêm gotas maiores,

pois apenas os aerossóis naturais estão disponíveis como núcleos de condensação de nuvens (NCN), enquanto a nuvem perturbada contém um maior número de gotas de nuvem menores, aerossóis naturais e antropogênicos estão disponíveis como NCN.

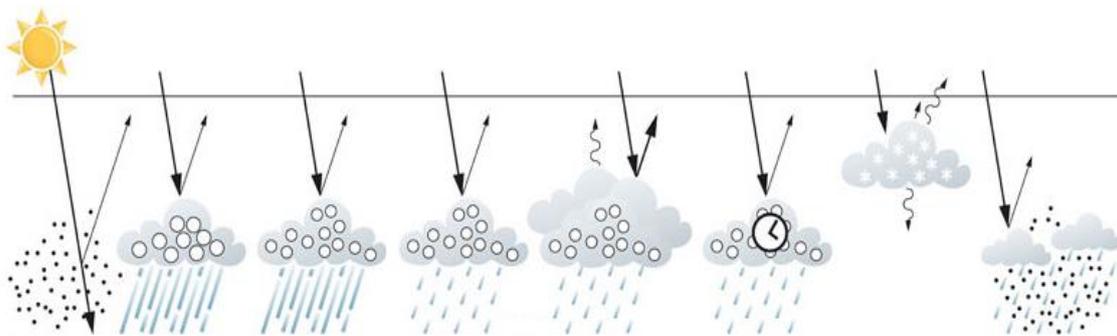
O poder médio global de onda curta (energia solar) é a constante solar dividida por 4. Com esse poder incidente, cerca de 30% da radiação solar é refletida para o espaço principalmente por nuvens (Albedo), dispersão de Rayleigh ou refletância da superfície. A absorção de radiação acontece na atmosfera ou na superfície. A superfície, por sua vez, emite radiação infravermelha, sendo que a temperatura média global da superfície é de aproximadamente 288 K (15°C), correspondente a equação de Stefan-Boltzmann para um corpo negro. O calor é transferido da superfície para a atmosfera (calor sensível) e pela evaporação e transpiração de água que posteriormente se condensa na atmosfera para formar nuvens (calor latente). Grande parte da radiação térmica infravermelha emitida na superfície é absorvida na atmosfera e irradiada novamente para baixo através das nuvens e gases como vapor d'água, dióxido de carbono (CO₂) e metano.

Penner et al. (2001) classificaram os efeitos radiativos causados por aerossóis em efeitos diretos e indiretos (Figura 1.4). Segundo eles, o efeito direto é o mecanismo pelo qual os aerossóis dispersam e absorvem a radiação de onda curta e onda longa, alterando assim o equilíbrio radiativo do sistema Terra-atmosfera. Logo, está relacionado com as propriedades ópticas do aerossol que varia em função do comprimento de onda, da umidade relativa do ar e de sua distribuição geográfica tanto na horizontal como na vertical, em função do tempo (HAYWOOD, BOUCHER, 2000; RAMASWAMY et al., 2001). Neste processo, a camada de aerossóis absorve a radiação solar, gerando aquecimento nesta camada e resfriamento nas camadas inferiores, bem como espalhando parte da radiação solar de volta para o espaço. Neste sentido, Procópio et al. (2004) concluíram que o aumento do aquecimento atmosférico pode aumentar a estabilidade da atmosfera, enfraquecer a turbulência, a convecção e aumentar a condição de seca durante esses períodos, provavelmente afetando a circulação regional e o ciclo hidrológico, no entanto, esta condição pode ser equilibrada pelo resfriamento que por sua vez pode causar redução na evaporação, diminuindo a precipitação e afetando o balanço hídrico.

O efeito indireto está relacionado ao fato de que o aerossol também pode atuar como núcleo de condensação de nuvens (NCN), alterando propriedades das nuvens

como reflectância, tempo de vida, fase, tamanho e precipitação (KOREN et al., 2007; ROCHA, 2011).

Figura 1.4 - Diagrama esquemático que mostra vários mecanismos radiativos associados aos efeitos de partículas de aerossóis na atmosfera. Os pequenos pontos pretos representam as partículas de aerossol. As setas representam a radiação solar incidente e refletida, e as linhas onduladas representam a radiação emitida. Os círculos brancos preenchidos indicam a concentração do número de núcleos de condensação de nuvens (NCN).



Fonte: Haywood e Boucher (2000)

A presença de partículas de aerossóis, suspensas na atmosfera, está relacionada ao ciclo hidrológico, pois formam os NCN, que somado ao vapor d'água constituem as gotículas do interior da nuvem (SILVA DIAS; ARTAXO; ANDREAE, 2004). Segundo Rizzo et al. (2002), Zhou et al. (2002) e Rissler et al. (2004), os NCN são partículas microscópicas de aerossol, que têm a finalidade de condensar a água. Cerca de 60 a 80% das partículas naturais de aerossóis na Amazônia atuam como NCN.

A diferença na concentração de NCN da estação chuvosa para a estação seca é de cerca de 200 para 20.000 partículas/cm² em grandes áreas da Amazônia e faz com que as propriedades microfísicas de nuvens sejam profundamente alteradas (ROSENFELD, 2000, SILVA DIAS et al., 2002). Quando a gota está formada, seu crescimento se dá através de uma série de mecanismos físicos, como difusão, colisão e coalescência. No intervalo de tempo que vai do processo de crescimento (20 micrômetros) até sua precipitação e, finalmente, chegada à superfície (1 a 2 milímetros), vários processos intermediários podem ocorrer.

Durante o estágio que antecede a precipitação, as gotas sentem o efeito da força da gravidade que as puxa para baixo. Nesse momento, ocorre um papel importante da quantidade de aerossóis e, em particular, dos NCN. Se o ambiente estiver limpo, ou seja, não poluído, há poucos NCN. Na disputa pelo vapor d'água existente, se houver alguns NCN relativamente grandes ou solúveis em água, estes vão crescer rapidamente, colidir com os menores e precipitar na forma de chuva. A nuvem não tem muito tempo

para crescer chegando no máximo a alturas de 4 ou 5 km, por isso são chamadas de nuvens rasas ou quentes.

Caso exista bastante poluição na atmosfera local e, portanto, com um número muito grande de NCN, como na época das queimadas florestais, a disputa pelo vapor d'água disponível aumenta, as gotas crescem pouco e devagar enquanto a nuvem vai crescendo. Muitas vezes essas nuvens nem chegam à precipitar, as gotas evaporam e a água, junto com os aerossóis, não retorna a superfície, mas é levada pelos ventos a outros locais. Porém, se a gota passar dos 6 ou 7 Km de altura, ela congela, pois o ar atinge temperaturas muito baixas. Essas pedrinhas de gelo formadas, crescem de forma bastante eficiente enquanto a nuvem cresce até 10 ou 15 Km de altura.

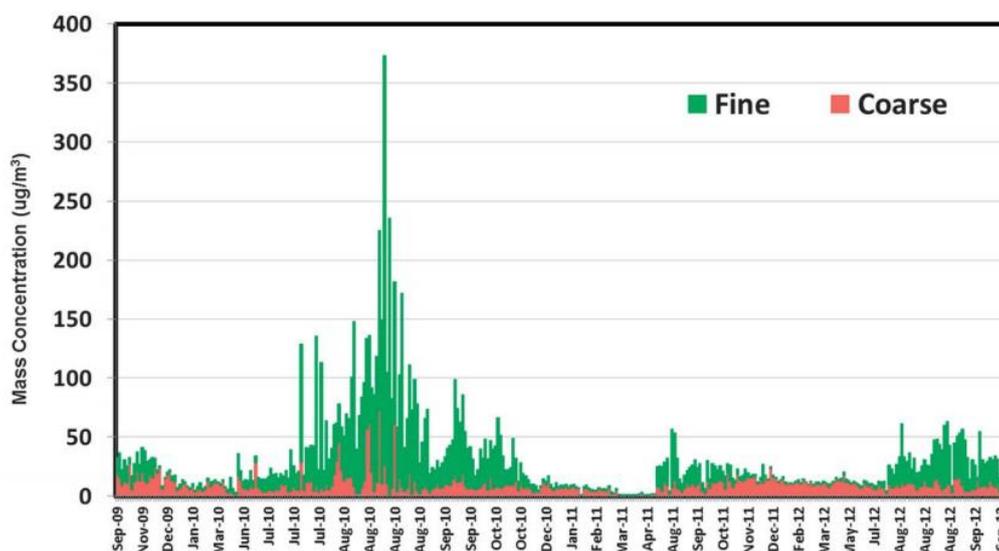
Na Amazônia, existem chuvas provocadas por dois tipos de nuvens, as rasas (quentes) e as profundas (frias) convivendo juntas na época mais limpa do ano, ou seja, a estação chuvosa, logo ressalta-se a importância de se analisar a sazonalidade do material particulado para uma determinada região, pois estudos mostram que a concentração de partículas em suspensão na atmosfera fica bastante reduzida na estação chuvosa, na ordem de 10 a 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, como mostrou Artaxo et al. (2005), enquanto que na estação seca, as concentrações são altas e observadas na ordem de 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Portanto, em regiões severamente afetadas pela queima da floresta, a concentração de aerossóis sobe para cerca de 300 a 600 $\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$, onde predomina a moda fina e que passa a predominar sobre a moda grossa. Segundo Haywood e Boucher (2000), estas partículas têm um tamanho da ordem do comprimento de onda na faixa do visível, o que faz delas eficientes espalhadores de radiação solar, podendo afetar de modo significativo o balanço de radiação atmosférica.

Além dos efeitos climáticos, os aerossóis também exercem efeitos significativos na vegetação. Segundo Yamasoe et al. (2006), ocorre um aumento da fração difusa da radiação solar que, particularmente, na região espectral fotossinteticamente ativa, pode aumentar a capacidade de fotossíntese, pois a radiação penetra de modo mais eficiente no dossel da árvore e atinge folhas que estariam sombreadas.

Durante as queimadas, grande parte da emissão de CO_2 está também vinculada à emissão de partículas (YAMASOE et al., 2006), quando então a moda fina (partículas < 2,5 μm , $\text{PM}_{2.5}$) dos aerossóis passa a predominar sobre a malha grossa (ARTAXO et al., 2013). A Figura 1.5 mostra uma série temporal de concentrações de massa em aerossol em modo fino e grosso para a cidade de Porto Velho-RO, no período de 2009 a 2012, onde observa-se que em 2010 houve um aumento significativo da emissão de fumaça

devido a queima de biomassa, por causa da forte seca que atingiu a região, o que mostra os efeitos de fortes estiagens na mudança das propriedades atmosféricas de um determinado local. Os anos de 2009, 2011 e 2012, com quantidades usuais de precipitação na região, tiveram concentrações de modo fino compreendido entre 2 a 4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Em analogia, Artaxo et al. (2002) relataram uma concentração média de 1,8 $\mu\cdot\text{m}^{-3}$ em um local próximo (reserva ecológica de Jarú, no estado de Rondônia) na estação seca de 1999. Com esse cenário, a saúde das populações é afetada de forma significativa, principalmente na região do arco do desmatamento (CASTRO et al., 2009; CARMO et al., 2010; MARTIN et al., 2010).

Figura 1.5 - Série temporal da concentração de massa do aerossol para $\text{PM}_{2.5}$ (em verde) e PM_{10} (em vermelho) no painel superior e BC equivalente (painel inferior) em Porto Velho (RO), entre 2009 e 2012.



Fonte: Artaxo et al. (2013).

1.4 Influência dos aerossóis atmosféricos na saúde humana

Estudos mostram que a globalização e o avanço da tecnologia aumentaram de forma significativa a quantidade, bem como a variedade de poluentes atmosféricos, diminuindo a qualidade de vida das pessoas (GOLUB; STRUKOVA, 2008). Estimativas globais da Organização Mundial de Saúde (OMS) atribuem os efeitos da poluição ambiental do ar ao material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$). Dados divulgados pela OMS, em 2018, mostram que a poluição do ar tem um impacto devastador sobre a saúde de uma criança. Esses mesmos dados mostram que globalmente, 93% de todas as

crianças vivem em ambientes com níveis de poluição acima das diretrizes estabelecidas pela OMS, que concluiu que houve 4,2 milhões de mortes prematuras em 2016, destas quase 300 mil foram de crianças com menos de 5 anos de idade (WHO, 2018), a maioria (98%) em países pobres, o que evidencia ainda mais a influência do fator social nas condições de saúde da população.

Os efeitos dos poluentes à saúde humana, entretanto, dependem das suas características físico-químicas, da concentração no ar que respiramos, da quantidade inalada, que tem relação com o esforço físico, do tempo em que os indivíduos permanecem expostos e, no caso do material particulado, do diâmetro da partícula, pois sugere-se que as partículas finas e ultrafinas são mais nocivas (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000). Ainda segundo os autores, partículas menores têm, proporcionalmente, maior número de átomos na superfície, aumentando de forma exponencial abaixo de 30 nanômetros, o que as torna mais reativas em contato com a camada de revestimento das vias aéreas do trato respiratório.

Para a OMS, a poluição atmosférica é considerada um problema de saúde pública cada vez mais evidente nas últimas décadas, afetando assim a população mundial. Além disso, a OMS também atribui um número crescente de mortes prematuras aos efeitos da poluição atmosférica de várias naturezas.

No Brasil, a legislação que rege os níveis de poluição atmosférica é de competência do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) que classifica qualquer tipo de material particulado em suspensão como poluente, se este estiver em desacordo com os níveis estabelecidos e que se torne impróprio ou nocivo à saúde humana e ao meio ambiente (CONAMA, 2018).

Ao longo das décadas de 90 e 2000, vários estudos têm mostrado um aumento no número de internações hospitalares por doenças respiratórias (BELL et al., 2006; HAJAT et al., 2001; POPE et al., 1995; SCHWARTZ; DOCKERY, 1992). Este aumento no número de internações está relacionado ao tempo e ao nível de exposição destas pessoas a poluentes presentes na atmosfera, principalmente crianças e idosos. Na Tabela 1.1 são apresentados os padrões de qualidade do ar recomendados pelo CONAMA e pela OMS (PF), a curto prazo (horas) e a longo prazo (anos).

A quantidade de aerossóis presentes na atmosfera aumentou principalmente por causa da crescente quantidade de poluentes lançada para a atmosfera nos grandes centros urbanos, mas principalmente em áreas florestais por meio da queima de biomassa florestal (KAUFMAN et al., 1998). A geração de energia, as atividades

industriais e as queimadas florestais constituem as causas antrópicas mais importantes de poluentes na atmosfera, quase todos nocivos à saúde humana. Devido a esses fatores, estudos realizados na última década têm demonstrado crescente preocupação com a qualidade do ar, frequentemente associada a efeitos adversos na saúde humana, com manifestações de sintomas, doenças e mortes (ALVES et al., 2017; PEREIRA et al., 2010; SALDIVA et al., 2010;).

Tabela 1.1 - Padrões de qualidade do ar para os principais poluentes atmosféricos recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e pela resolução N° 491 do CONAMA de 19 de novembro de 2018. PI: Padrão de qualidade do ar intermediário; PF: Padrão de qualidade do ar final estabelecido pela OMS.

Poluente atmosférico	Período de	PI-1	PI-2	PI-3	PF
		mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
Material Particulado – PM ₁₀	24 horas	120	100	75	50
	Anual	40	35	30	20
Material Particulado – PM _{2,5}	24 horas	60	50	37	25
	Anual	20	17	15	10
Dióxido de Enxofre – SO ₂	24 horas	125	50	30	20
	Anual	40	30	20	-
Dióxido de Nitrogênio – NO ₂	1 hora	260	240	220	200
	Anual	60	50	45	40
Ozônio – O ₃	8 horas	140	130	120	100
Fumaça	24 horas	120	100	75	50
	Anual	40	35	30	20
Partículas totais em suspensão -	24 horas	-	-	-	240
	Anual	-	-	-	80
Chumbo - Pb ₅	Anual	-	-	-	0,5

Fonte: CONAMA (2018)

Alves et al. (2017) mostraram com detalhamento inédito, os danos na saúde humana ocasionados pela fumaça de queimadas na floresta amazônica, cujos efeitos podem se estender por toda América do sul. Este estudo interdisciplinar mostrou como a exposição à fumaça causa danos ao DNA e mortes das células pulmonares, conforme ilustrado na Figura 1.6. Os resultados desta pesquisa demonstram que as partículas de queimadas ao entrarem nos pulmões causam inflamações, aumentam o estresse oxidativo e podem causar lesões importantes ao material genético. O dano ao DNA pode ser tão grave que a célula perde a capacidade de crescer, multiplicar, podendo chegar a morte. O contrário também pode acontecer, pois a célula pode perder também o controle de divisão celular e passar a se reproduzir desordenadamente, evoluindo para

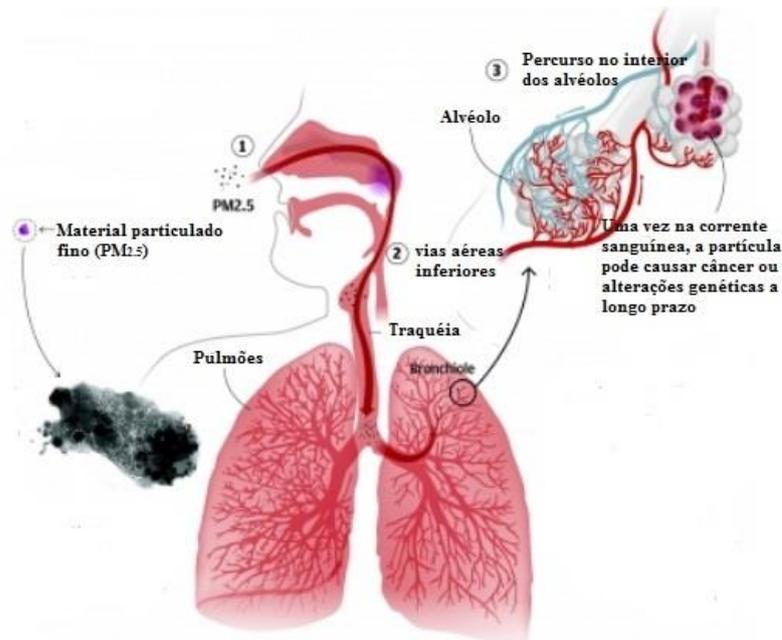
um câncer de pulmão, conforme foi mostrado também por Moller et al (2008) e Donaldson e Poland (2012).

O sistema respiratório humano tem vários mecanismos que ajudam na proteção contra partículas de poluição. As próprias vias aéreas superiores são capazes de filtrar e capturar boa parte do material particulado de maior diâmetro, mas não as menores. A Figura 1.6 mostra que partículas finas e ultrafinas de aerossóis ($PM_{2.5}$) fazem um longo trajeto através trato respiratório e ficam alojadas no interior dos pulmões, chegando até os alvéolos, o que pode provocar asma e, em casos mais graves, câncer de pulmão e alterações no DNA que podem ser passadas para gerações futuras por causa do desencadeamento de mutações genéticas. Anos de exposição à poluição atmosférica podem levar ao surgimento de outras doenças respiratórias como bronquite crônica e enfisema pulmonar caracterizados principalmente pela falta de ar.

Das milhões de mortes que ocorrem prematuramente em decorrência de síndromes respiratórias, em todo o mundo, a maioria ocorre na Ásia, em países como China que registra em média 500 mil mortes por ano, somente em decorrência dos altos índices de poluição do ar. Regiões metropolitanas como Ulan Bator (Mongólia), Cidade do México (México), Nova Deli (Índia) e Pequim (China) estão no topo das mais poluídas do mundo.

A pobreza, relacionada ao índice de desenvolvimento humano (IDH), é outro fator social relevante que aumenta a poluição e, conseqüentemente, os problemas respiratórios em crianças, pois comunidades de baixa renda e zonas rurais sofrem os efeitos da poluição, diretamente. A pobreza faz com que pessoas dependam mais de fontes poluidoras para sua sobrevivência e as limita em relação a capacidade de melhorar o ambiente onde moram, já que são forçadas a procurar lenha e combustíveis para cozinhar seus alimentos dentro de suas casas, de forma precária, o que aumenta a vulnerabilidade às doenças respiratórias (WHO, 2018).

Figura 1.6 - Esquemática do trajeto do $PM_{2.5}$ no sistema respiratório humano, devido ao grande tempo de exposição à poluição do ar, com o possível desenvolvimento de graves doenças pulmonares e alterações genéticas que podem ser passadas para gerações futuras.



Fonte: Adaptado de Environmental Protection Department (EPD), Hong Kong, China (2014).

Levando em consideração a Figura 1.6 e todos os argumentos expostos anteriormente, constata-se que a mortalidade mundial por doenças respiratórias atinge milhões de crianças no mundo inteiro, sendo que a maioria em países emergentes como o Brasil (WHO, 2005). Ainda segundo a fonte, entre os menores de um ano de idade, as doenças respiratórias são responsáveis por aproximadamente 10% das mortes e mais da metade das internações hospitalares registradas no Brasil são de crianças.

Pesquisas realizadas por Nell et al. (1998), Brook et al. (2002) e Pope (2004), relatam que a exposição à poluição atmosférica está relacionada a ativação de vias inflamatórias, vasoconstrição arterial, alterações imunológicas e aos fatores de coagulação do sangue. Ainda é considerado pequeno o número de estudos que relacionam doenças respiratórias à exposição de aerossóis atmosféricos provenientes de queimadas. Um estudo feito por Castro et al. (2009) investigou a tendência da mortalidade por doenças respiratórias em idosos e as queimadas no estado de Rondônia num período de 7 anos. Os autores descobriram uma tendência de crescimento nas taxas de mortalidade por doenças do aparelho respiratório e doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), entre os idosos acima de 65 anos, ao mesmo tempo que aumentou o número de focos de calor. Resultados como este, demonstram a gravidade do problema

das queimadas e o impacto que elas podem causar na saúde respiratória da população mais vulnerável.

Ignotti et al. (2010) utilizaram um indicador de exposição ambiental apresentado como a porcentagem de horas anuais (HA %) de $PM_{2.5}$ acima de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e concluíram que a associação do indicador foi maior para os idosos do que para os demais grupos etários. Para cada aumento de 1% no indicador de exposição, houve um aumento de 8% na hospitalização infantil, 10% na hospitalização de idosos e 5% na faixa etária intermediária, sendo que não foi encontrada associação entre HA% e a hospitalização por parto, como era esperado.

Carmo et al. (2010) mostraram que a saúde da população é afetada de forma significativa, principalmente na região do arco do desmatamento, na Amazônia brasileira. Segundo eles, as condições atmosféricas consideradas limpas durante a estação chuvosa na Amazônia são alteradas durante a estação seca devido às emissões de partículas de aerossóis provenientes de queimadas de pastagens dentro da floresta. Isso gera importantes implicações a nível local, regional e até mesmo global (ARAÚJO et al., 2007; ARTAXO, 2005).

Segundo Gomes (2002), as partículas inaladas podem depositar-se nas vias aéreas e interferir na atividade dos mecanismos de limpeza do pulmão ou depositar-se no interior do pulmão e, eventualmente, contribuir para o desenvolvimento de DPOC, enfisema ou câncer de pulmão se a exposição se mantiver durante anos. O pulmão pode ainda servir de porta de entrada para a circulação sistêmica e com isso vários órgãos podem ser atingidos. A inalação crônica de gases e vapores pode causar por via sistêmica lesões de vários órgãos e sistemas, nomeadamente fígado e medula óssea.

Uma vez inaladas, as partículas de aerossol depositam-se nas vias aéreas superiores e inferiores a vários níveis. As de dimensões superiores a $100\mu\text{m}$ não atingem o pulmão, mas as menores que $10\mu\text{m}$ podem atingi-lo por inalação. As partículas mais finas (inferiores a $0,5\mu\text{m}$) podem reduzir a visibilidade e aumentar a acidez do ar, mas a sua penetração nas vias aéreas é de apenas 20%. As partículas entre 2.5 e $10\mu\text{m}$ depositam-se essencialmente nos brônquios principais.

Em corroboração ao que foi mostrado por Gomes (2002), anos mais tarde, outros estudos também mostraram fortes correlações entre internações hospitalares por doenças respiratórias e cardiovasculares e a exposição a poluentes presentes na atmosfera em diferentes regiões (BELL et al., 2006; BROOK et al., 2002). Segundo os autores, algumas faixas etárias são consideradas mais vulneráveis, como crianças,

idosos e aqueles com histórico de doenças cardiopulmonares, mesmo quando os níveis de exposição são considerados seguros pela legislação ambiental.

Os efeitos adversos dos níveis atuais de poluição do ar durante a estação seca da Amazônia, no trato respiratório de crianças foi mostrado por Jacobson et al. (2014). Estes autores fizeram estimativas dos níveis atuais de poluição do ar devido a queima de biomassa. As análises revelaram reduções no pico do fluxo respiratório para PM_{10} e $PM_{2.5}$ e aumento para *black carbon*. Os autores também concluíram que as reduções no pico do fluxo respiratório foram associadas à poluição do ar, principalmente para exposições com defasagem de 3 a 5 dias e para crianças mais novas.

Em regiões metropolitanas como a de Belém (RMB), com quase 50 anos de existência e aproximadamente 2,5 milhões de habitantes (IBGE, 2021), a degradação ambiental resultante de processos de transformação no uso da terra afeta as condições atmosféricas em escala local e regional, bem como no ciclo hidrológico (ANDRADE et al., 2017). Este impacto ocorre não só por conta da emissão de poluentes, mas também pela modificação da superfície e por causa das conseqüentes alterações no balanço de radiação e na formação de chuvas. Os efeitos adversos no clima local, no ciclo hidrológico, na segurança pública e na saúde permanecem desconhecidos em muitas localidades.

1.5 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa

Dados recentes da Organização Mundial de Saúde (OMS) apontam 4,2 milhões de mortes prematuras só no ano de 2016 causadas por complicações respiratórias derivadas da intensa poluição atmosférica, sendo que 300 mil destes óbitos foram de crianças em todo o mundo. Outro dado importante a ser mencionado é o fato de 91% da população mundial viver em regiões onde a qualidade do ar está abaixo dos padrões indicados pela OMS. Somado a este problema grave de saúde coletiva está o progressivo aumento do desmatamento no estado do Pará, estado brasileiro que também ocupa o topo do *ranking* em toda a série histórica de queimadas desde 2002. São pelo menos 19 anos com a maior quantidade de focos de calor da região amazônica, segundo os satélites utilizados como referência pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Diante deste cenário preocupante, torna-se importante o desenvolvimento de pesquisas voltadas a esta temática no sentido de mitigar problemas ambientais e sociais

causadores de poluição atmosférica, bem como no desenvolvimento de ações sinérgicas preventivas para que gerações futuras possam ter mais qualidade de vida.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo Geral

Investigar a variabilidade das queimadas e das internações hospitalares por doenças respiratórias em crianças e sua relação com a poluição atmosférica na Amazônia oriental.

1.6.2 Objetivos Específicos

I – Analisar a sazonalidade do clima e das ocorrências de queimadas com a profundidade óptica do aerossol (AOD) relacionada com as internações hospitalares por doenças respiratórias para os municípios de Marabá e Santarém, nas escalas mensal e decadal;

II – Correlacionar o material particulado fino ($PM_{2.5}$), queimadas florestais e taxa de internação por doenças respiratórias, a partir de eventos extremos de clima selecionados para os municípios de Marabá e Santarém, nas escalas diária e mensal;

III – Analisar um estudo de caso, correlacionando internações hospitalares por doenças respiratórias, queimadas florestais e $PM_{2.5}$ em um episódio específico nos municípios estudados nas escalas diária e mensal;

1.7 Estrutura da Tese

Esta pesquisa está estruturada da seguinte forma:

Ao todo são cinco capítulos, onde o **capítulo 1** apresenta uma visão geral sobre o tema abordado nesta pesquisa, além de fazer uma revisão bibliográfica sobre o aumento populacional em grande e pequena escala, o desmatamento na Amazônia seguido pelo processo de queimadas, a poluição atmosférica e os danos causados à saúde humana. Ao final do capítulo são apresentados os objetivos que norteiam este estudo.

O **capítulo 2** contempla o primeiro artigo científico que trata sobre a relação entre clima, profundidade óptica do aerossol e o número de internações hospitalares por doenças no trato respiratório em crianças até nove anos de idade para dois municípios do estado do Pará: Marabá e Santarém, atendendo ao primeiro objetivo específico da pesquisa.

O **capítulo 3** contempla o segundo artigo científico, onde é apresentada uma análise das mesmas relações do capítulo anterior, porém baseada em eventos extremos de clima na Amazônia oriental, incluindo mais uma variável, o PM_{2.5}. No total foram selecionados quatro eventos para o estudo.

O **capítulo 4** contempla o terceiro artigo científico, o qual faz um estudo de caso de um importante episódio de queimadas no estado do Pará e investiga suas implicações na qualidade do ar e na saúde humana dos municípios estudados.

O **capítulo 5** faz uma conclusão geral sobre a pesquisa, abordando os resultados chaves, as prioridades futuras e as dificuldades encontradas durante a pesquisa.

CAPÍTULO 2 INTER-RELAÇÕES ENTRE DOENÇAS RESPIRATÓRIAS E CONDIÇÕES AMBIENTAIS: UMA ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS NA AMAZONIA ORIENTAL

RESUMO

Este estudo fez uma análise da inter-relação entre as séries temporais do clima, desmatamento, queimadas, profundidade óptica do aerossol (AOD) e internações hospitalares por doenças respiratórias, na Amazônia oriental. Através de um estudo descritivo com delineamento ecológico de séries temporais de 18 anos de dados, foram feitas análises estatísticas para dois períodos preestabelecidos, chuvoso e seco. Na escala decadal, mediante análises do sinal dos índices climáticos, Índice de Oscilação Sul (IOS) e o Modo Meridional do Atlântico (MMA), Marabá apresenta concordância entre internações, focos de queimadas e AOD, o que não se observa com a mesma exatidão para Santarém. Na escala sazonal, nossas análises mostraram que os dois municípios estudados nesta pesquisa apresentaram um aumento no número de internações na estação seca, Marabá (3%) e Santarém (5%), a mesma estação também apresentou um maior número de queimadas, AOD e alto valor de temperatura. A análise mensal do AOD mostrou que a atmosfera de Marabá pode estar sendo influenciada pela presença de outros tipos de aerossóis, como os emitidos pela atividade mineradora, logo há uma defasagem no tempo de aproximadamente 2 meses em relação as ocorrências de queimadas registradas dentro do município. Santarém não apresentou essa defasagem. A análise de regressão linear mostrou que há correlação acima de 64% (Marabá) e 50% (Santarém), estatisticamente significativa, comprovando que a taxa de internação por doenças respiratórias depende do valor do AOD. Dos municípios investigados, Marabá é a localidade que apresenta o maior número de incêndios florestais com média de 188.5 (Santarém 68.7) e, portanto, o maior valor de AOD com média de 0.66 (Santarém 0.47), ambos para a estação seca. Fica evidente que a componente climática tem relevante contribuição para o aumento das internações, principalmente na estação chuvosa, onde há pouco ou nenhum registro de focos de incêndio.

Palavras-chave: poluição do ar; desmatamento; queimadas; clima; Pará.

*Artigo publicado na Revista Brasileira de Ciências Ambientais, qualis A3 para ciências ambientais, segundo a classificação de periódicos da CAPES, em 05/04/2021.

ABSTRACT

This study analyzes the interrelationship between time series of climate, deforestation, fires, aerosol optical depth (AOD) and hospital admissions for respiratory diseases in eastern Amazonia. Through a descriptive study with an ecological design of 18-year time series of data, statistical analyzes were performed for two pre-established periods, rainy and dry. On a decadal scale, by analyzing the signal of climatic indices, south oscillation index (SOI) and the southern Atlantic mode (AMM), Maraba presents an agreement between hospitalizations, fires and AOD, which is not observed with the same accuracy to Santarem. On a seasonal scale, our analyzes show that the two municipalities studied in this research showed an increase in the number of hospitalizations in the dry season, Maraba (3%) and Santarem (5%), the same season also had a higher number of fires, AOD and high temperature value. The monthly analysis of the AOD showed that the atmosphere of Maraba may be influenced by the presence of other types of aerosols, such as those emitted by the mining activity, so there is a time lag of approximately 2 months in relation to the occurrences of fires registered within the municipality. Santarem did not show this lag. The linear regression analysis shows that there is a correlation above 64% (Maraba) and 50% (Santarem), which is statistically significant, proving that the hospitalization rate for respiratory diseases depends on the AOD value. Of the investigated municipalities, Maraba is the location with the highest number of forest fires with an average of 188.5 (Santarem 68.7) and therefore the highest AOD value with an average of 0.66 (Santarem 0.47), both for the dry season. It is evident that the climate component has a relevant contribution to the increase in hospitalizations, especially in the rainy season, where there is little or no record of fire outbreaks.

Keywords: air pollution; deforestation; fires; climate; Para.

2.1 Introdução

Os maiores aglomerados populacionais estão presentes nos centros urbanos que por sua vez apresentam características físicas das mais diversas ordens, como geológicas, de uso e ocupação, climáticas e sociais. Ao tratar a cidade como um espaço orgânico, em constante construção e produção, é possível entender que ela promove um acúmulo de fenômenos sociais e ambientais. Esses podem influenciar diretamente na saúde e na qualidade de vida da população (DONALDSON; POLAND, 2012).

Alguns estudos têm buscado o entendimento da relação entre clima e o aumento da poluição atmosférica, em suas diversas formas. Isto se deve ao agravamento dos incêndios florestais que afetam severamente o equilíbrio ambiental e, conseqüentemente, a saúde humana. Assim, a variabilidade de algumas variáveis ambientais, como os mecanismos climáticos oceano-atmosfera sobre o Atlântico e Pacífico, influenciam na modulação de variáveis ambientais (LIMBERGER; SILVA, 2016) e, conseqüentemente, na combustão da biomassa e na manutenção do fogo na floresta.

Nos últimos anos têm-se observado um maior interesse internacional no controle das queimadas florestais na Amazônia, devido às mudanças climáticas e ao desmatamento em larga escala (GONÇALVES; CASTRO; HACON, 2012). Grande parte das doenças é causada ou influenciada por fatores ambientais, dentre eles as condições climáticas que vêm ganhando espaço em estudos epidemiológicos. Mas, quando se leva em conta as inter-relações entre os componentes do clima, desmatamento, queimadas e saúde humana, fica evidente que ainda são escassos os estudos voltados para essa questão na Amazônia oriental. O processo de derrubada da floresta seguido das queimadas representa duas das maiores questões ambientais da atualidade e, quando combinado às condições de extremos climáticos, pode agravar a saúde humana local, principalmente em cidades com baixo índice de desenvolvimento humano (IDH) e pouca infraestrutura hospitalar (SMITH et al., 2014).

Outro problema que pode contribuir para o aumento da poluição atmosférica nos grandes centros urbanos é o crescimento da população, que cresce de maneira exponencial. Coletivamente as pessoas do mundo inteiro consomem uma quantidade muito grande de alimento, água, matéria-prima e, conseqüentemente, produzem muita

poluição, portanto estão mais expostas à quantidade de material particulado produzido dentro do próprio ambiente onde vivem (MILLER; SPOOLMAN, 2015).

Estudos sugerem que o tamanho das partículas que constituem o material particulado, cujo diâmetro pode variar de alguns nanômetros a dezenas de micrômetros, está diretamente associado ao seu potencial de causar problemas respiratórios, pois quanto menor for o diâmetro, maiores serão os efeitos provocados (ALVES et al., 2017).

Segundo Padilla et al. (2014), fatores socioeconômicos também podem contribuir para os efeitos do material particulado na vida humana. Este estudo mostra que populações que vivem em piores condições de vida são mais vulneráveis a problemas respiratórios por estarem mais expostas às condições ambientais insalubres. Outro fator importante a ser ressaltado é a distribuição geográfica desigual das condições de vida da população e do tráfego urbano, pois uma exposição diferencial aos efeitos do material particulado pode aumentar o risco de mortalidade por doenças respiratórias (RODRIGUES, IGNOTTI; HACON, 2019). Outros autores como Forastiere et al. (2007) defendem que, em escala local, impactos ambientais podem contribuir de forma significativa para as desigualdades sociais, logo, pessoas que apresentam precárias condições de vida estão mais restritas ao acesso de serviços básicos de saúde.

Estudos mostram que 98% das mortes em crianças causadas por doenças respiratórias acontecem em países pobres ou em desenvolvimento (WHO, 2018). Em geral, crianças podem apresentar uma vulnerabilidade maior em relação às demais faixas etárias, pois em menores de 10 anos de idade e maiores de 60, os materiais particulados finos ($PM_{2.5}$) presentes na atmosfera chegam de forma mais eficaz em suas vias respiratórias inferiores, brônquios e alvéolos pulmonares, podendo causar alterações genéticas e desenvolvimento de tumores (ALVES et al., 2015a, 2017b).

As pesquisas sobre partículas em suspensão oriundas de queimadas florestais ainda são bastante incipientes, principalmente devido à ausência de dados de poluentes atmosféricos. No entanto, o sensoriamento remoto pode auxiliar no preenchimento desses dados, tanto para a profundidade óptica do aerossol (AOD), como para o $PM_{2.5}$, principalmente em regiões onde não há medições em superfície, como é o caso de algumas partes da Amazônia (ANDREÃO et al., 2020). Para isso, o mais aplicável produto por satélite para estimar as concentrações de $PM_{2.5}$ é a profundidade óptica do aerossol (AOD), que é um indicador de aerossóis espalhadores de radiação solar na

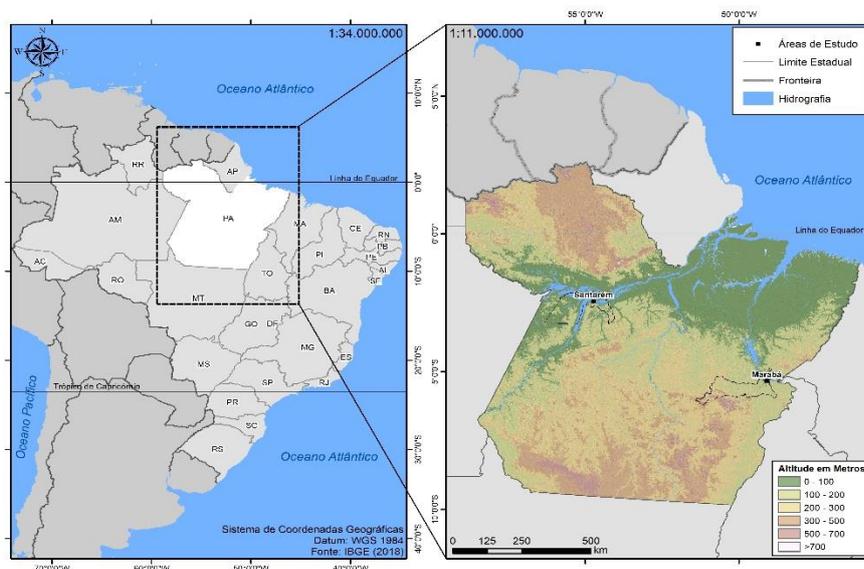
coluna vertical da atmosfera, bem característico na fumaça oriunda de queimadas florestais, por causa da alta concentração de matéria orgânica em suspensão. Em termos gerais, mede-se extinção de radiação por dispersão e absorção de aerossóis na coluna atmosférica. Assim, com base nesse contexto, este estudo visa evidenciar as inter-relações entre longas séries temporais do clima, desmatamento, queimadas e internações hospitalares por doenças respiratórias na Amazônia oriental.

2.2 Material e Métodos

A área de estudo escolhida para esta pesquisa foi o estado do Pará, na Amazônia oriental (Figura 2.1), que possui 144 municípios distribuídos em toda sua extensão territorial. Dentre todos os municípios, Marabá e Santarém foram escolhidos por representarem importantes centros urbanos, estarem entre os mais habitados, industrializados e possuírem grandes hospitais de alta e média complexidade para o atendimento da população. Além disso, os municípios mencionados estão localizados na área do arco do desmatamento, a leste do estado (Marabá) e na região do baixo Amazonas, localizada na parte oeste (Santarém).

Todo o banco de dados utilizado neste estudo foi representativo do período de 2000 a 2017, na escala mensal e sazonal representados pelas variáveis Profundidade Óptica do Aerossol (AOD), índices climáticos de Oscilação Sul (IOS) e do Modo Meridional do Atlântico (MMA), focos de queimadas, desmatamento, precipitação, umidade relativa do ar, temperatura do ar e internações hospitalares (variável social) por doenças respiratórias. Além desse período de dados, para análise sazonal, os períodos foram separados em chuvoso (janeiro-maio) e seco (junho-dezembro), com base na climatologia regional.

Figura 2.1 - Mapa da área de estudo, com a localização geográfica do país, estado e dos municípios de Marabá e Santarém no estado do Pará.



Para obter o dado do AOD em 550 nm, com resolução de 3 Km da coleção 6.0, foram utilizadas as estimativas realizadas pelo sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua (Di NICOLANTONIO et al., 2009; VAN DONKELAAR et al., 2010). Isso inclui os modelos ópticos espectrais para estimativas de inúmeras propriedades dos aerossóis, incluindo AOD, produto denominado MOD04L2-3K e MYD04L2-3K em formato *hdf* (LYAPUSTIN et al., 2018). Os dados diários de AOD foram compostos a partir da média diária dos dois horários, depois transformados em médias mensais para uma área de 40 Km² em torno da sede de cada município estudado.

Os dados dos índices climáticos de MMA e IOS estão disponíveis em escala mensal no portal <https://psl.noaa.gov/data/climateindices>. Estes têm por objetivo representar os aspectos climáticos, através do sinal das condições oceano-atmosfera dos oceanos Atlântico e Pacífico tropicais que modulam a precipitação e demais variáveis atmosféricas. Os sinais desses índices indicam as condições climáticas, a partir das fases dos dipolos do MMA, quando positivo (desfavorável às chuvas) e negativo (favorável às chuvas), assim como as fases do IOS, negativa para El Niño e positiva para La Niña (PEREIRA et al., 2017). Quando o MMA está positivo (negativo), as águas superficiais do Atlântico tropical ficam mais resfriadas (aquecidas) no hemisfério sul, isso faz com que a estação chuvosa na Amazônia fique mais escassa (abundante). No Pacífico tropical, eventos de El Niño (La Niña) tendem a diminuir (aumentar) as chuvas nos extremos oeste e leste da Amazônia (KAYANO et al., 2019; SOUSA; CANDIDO; ANDREOLI, 2018).

Os dados de desmatamento anual foram obtidos através do portal do programa PRODES/INPE (<http://www.obt.inpe.br/prodes>), o qual utiliza imagens de satélite LANDSAT (MONTIBELER et al., 2020) com grande utilidade para o planejamento de políticas públicas na Amazônia.

Dados de focos de queimadas também estão disponibilizados pelo INPE (<http://www.queimadas.dgi.inpe.br/queimadas>), via sensoriamento remoto. Utilizamos aqui os dados fornecidos pelo satélite de referência (órbita polar) através de sensores AVHRR (passagem diária no final da tarde) e MODIS (passagem diária no início da tarde, hora local), com resolução de 4 Km a 5 Km, fornecidos pela NASA.

Dados de precipitação (PRP), disponibilizados pelo CPTEC/INPE foram obtidos através do produto *Multi-satellitE Retrievals for GPM* (MERGE). Esta técnica consiste em combinar a precipitação observada em superfície com a precipitação estimada por satélite (ROZANTE et al., 2010), sendo disponibilizados em formato binário com resolução de 20 km, com saídas diárias (acumulado de 24 horas), porém aqui transformados em acumulados mensais, cobrindo toda a América do Sul. Além desses, foram também utilizadas médias mensais de umidade relativa (UR) e da temperatura do ar (T), cedidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para as estações convencionais de superfície dos municípios de Marabá e Santarém, na Amazônia oriental.

Para esta pesquisa foi feito um estudo ecológico de série temporal, de acordo com a listagem de todos os tipos de doenças respiratórias, codificada de J00 a J99 e regida pela classificação internacional de doenças (CID-10), estabelecida pela Organização Mundial de Saúde (OMS). A faixa etária estabelecida foi de 1 a 9 anos de idade para ambos os sexos, por representar um grupo bastante vulnerável às doenças respiratórias (LEÃO et al., 2011). Foram descartados indivíduos menores de um ano de idade por permanecerem mais tempo em suas residências em relação as outras faixas etárias. Todas as variáveis envolvidas neste estudo, exceto os índices climáticos foram submetidos ao cálculo de anomalias e médias móveis de 6 meses para cada uma delas e para cada município, a fim de que as tendências, os padrões temporais, as oscilações e os períodos extremos entre as variáveis fossem identificados da melhor forma possível, ao longo da série temporal.

Foram calculadas anomalias mensais de todas as variáveis utilizadas neste trabalho. As séries históricas foram separadas em duas décadas, com o intuito de detectar tendências qualitativas dominantes na variabilidade das anomalias que podem

ter contribuído para o aumento dos focos de queimadas e, conseqüentemente, no número de internações hospitalares.

Para uma melhor análise da série de AOD e internações hospitalares foram observadas a amplitude e a assimetria dos dados, através dos pontos máximos e mínimos e da mediana, respectivamente. Para isso, foram construídos diagramas de caixa, conhecidos como *boxplot*. Esse tipo de análise permite visualizar a distribuição de valores ao longo da série e possíveis discrepâncias dos dados (SEWARD; DOANE, 2014).

Para a construção do modelo de regressão linear foi considerada como variável dependente (Y), o número de internações hospitalares e como variável independente (X), a profundidade óptica do aerossol (AOD). A estatística gerada pelo cálculo da regressão também contempla o cálculo dos coeficientes de determinação (R^2), correlação (r) e o p -valor $< 0,05$, com intervalo de confiança de 95%.

Para um melhor entendimento da análise estatística de regressão linear, foi calculada a taxa de internação hospitalar a partir do número de registros mensais de internações hospitalares em crianças até nove anos de idade, a cada mil habitantes, para os dois municípios.

2.3 Resultados e Discussões

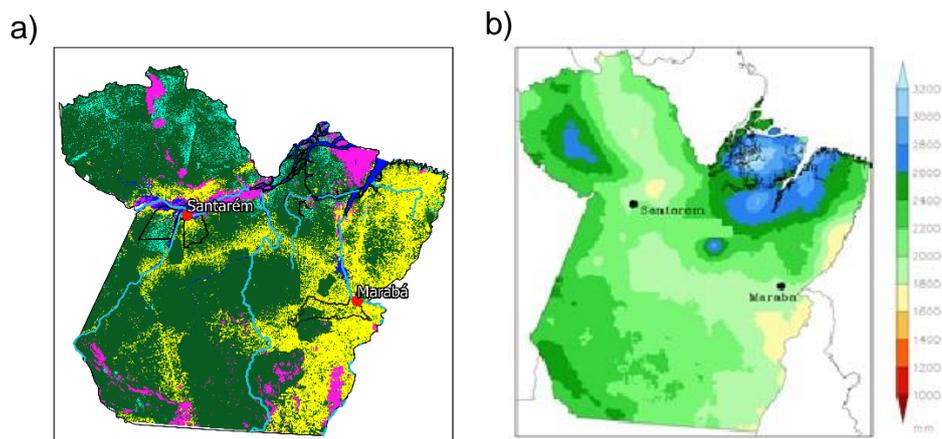
A Figura 2.2 mostra que as áreas mais antropizadas do estado do Pará coincidem com as áreas de menor valor de precipitação anual, como no extremo leste, onde se localiza o município de Marabá, no arco do desmatamento e na porção central do estado (centro-sul). Além disso, o mosaico do desmatamento mostra que a região no entorno de Marabá apresenta maior devastação natural do que Santarém. Portanto, os efeitos no volume de chuvas locais devem apresentar grandes diferenças em ambos os locais, como em Marabá de 1800 a 2000 mm e Santarém de 2000 a 2400 mm anuais. Estudos mostram que áreas que apresentam volumes consideráveis de chuva tendem a apresentar maior qualidade do ar (GONÇALVES; MASSAMBANI, 2010), uma vez que a precipitação tem a função de limpar a atmosfera, diminuindo a poluição. O contrário acontece em áreas com pouco volume de chuvas. Debortoli et al. (2017) concluíram que, em escala regional, há uma forte correlação entre cobertura florestal e precipitação regional, o que sugere que quanto maior a área de floresta preservada, maiores são as

probabilidades de ocorrência de chuvas mais volumosas, na direção oposta aos efeitos observados em escala local (DAVIDISON et al., 2012).

Estudos sugerem que a contribuição local da evapotranspiração para a precipitação que ocorre na Amazônia, fica na ordem de 20-35% (ROCHA; CORREIA; FONSECA, 2015), logo o avanço do desmatamento impacta diretamente nas chuvas de uma determinada região e está diretamente relacionado ao aumento das queimadas florestais, devido às mudanças no uso da terra (COUTINHO et al., 2018; SEIXAS; PINHEIRO, 2014), principalmente no arco do desmatamento.

Os índices climáticos MMA e IOS são os indicadores de maior importância na modulação das chuvas na Amazônia. A Figura 2.3 mostra que mesmo com alguns picos negativos, a dominância do sinal na série do MMA se mostra positiva ao longo do tempo, o que é desfavorável à precipitação, diminuição no transporte de umidade e aumento da temperatura do ar no leste da Amazônia (LIMBERGER; SILVA, 2016). A série do IOS também apresenta um maior número de picos positivos ao longo do tempo, o que indica uma maior quantidade de eventos de La Niña, favorecendo a precipitação, com destaque para o período de 2003 a 2005 e os anos de 2015 e 2016, onde o índice se mostrou negativo.

Figura 2.2 - Características ambientais do estado do Pará, com a hidrografia e a localização dos municípios de Marabá e Santarém: a) áreas totais desmatadas (amarelo) e áreas de floresta preservadas (verde) de 2000 a 2017; b) média climatológica da precipitação anual do produto CHIRPS de 1981 a 2017.



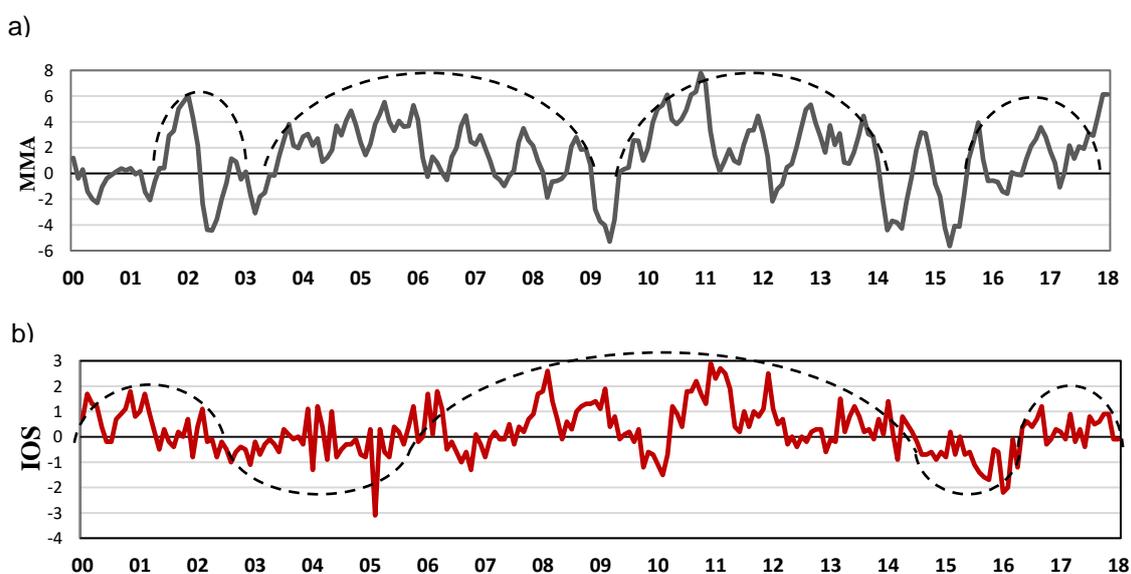
As três primeiras variáveis apresentadas na Figura 2.4(A-C) mostram que Marabá apresenta fases de aproximadamente 10 anos (2000-2009) em que a precipitação tem valores majoritariamente positivos na primeira década ($+ 70.0 \pm 60.6$ mm), condizente com a primeira década do IOS que também, em maior parte, apresenta

valores positivos, com ocorrências mais frequentes de eventos de La Niña, o que favorece as chuvas na região (ARAÚJO et al., 2013). Temperatura do ar e umidade relativa apresentam comportamento contrário, com temperaturas acima da média e umidade abaixo da média, na primeira década analisada ($+ 0.6 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ e $- 2.9 \pm 2.1\%$). Esse comportamento também é observado na segunda década.

É importante salientar que a série de umidade do ar em Marabá se mostrou contrária a de precipitação, devido ao alto grau de degradação da cobertura vegetal do município, fazendo com que o ciclo hidrológico seja alterado. Mesmo com anomalias positivas de chuva, há pouca infiltração e, conseqüentemente, aumento da evaporação, ou seja, alterando diretamente o ciclo hidrológico da região (DUARTE et al., 2009).

Isso sugere que o município de Marabá, por apresentar um ambiente natural bastante degradado, com grandes áreas desmatadas, diferentes coberturas do solo e diversas atividades industriais, apresenta um desequilíbrio no comportamento das variáveis ambientais, além de sofrer influência de oscilações climáticas globais, em relação a outras localidades que não apresentam as mesmas modificações na paisagem natural, conforme um estudo feito por Pires e Costa (2013), que mostrou que a degradação ambiental na região do arco do desmatamento pode causar graves desequilíbrios bioclimáticos.

Figura 2.3 – Distribuição dos valores de anomalias mensais dos índices climáticos de 2000 a 2017: a) MMA (Atlântico); b) IOS (Pacífico). A linha mais suavizada representa a média móvel de 6 meses e a linha tracejada representa a dominância do sinal das fases positiva e negativa.



Apesar do IOS apresentar uma fase positiva na segunda década, com mais eventos de La Niña, a precipitação em Marabá mostrou uma fase negativa na segunda década, desta vez, influenciada pelo sinal do MMA que mostrou, ao longo da série, valores majoritariamente positivos, principalmente na segunda década, o que desfavorece a precipitação na região amazônica (JESUS; VITORINO; SANTOS, 2017), diferente da primeira década, em que a precipitação ficou acima da média e a umidade abaixo da média ($-0.6 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ e $-2.5 \pm 2.1\%$).

É possível observar que o município de Santarém (Figura 2.4d-f), representado pelos três últimos gráficos, apresenta fases bastante concordantes em relação à série do IOS, para as mesmas variáveis analisadas para Marabá. À medida que o IOS mostra que a primeira década tem uma frequência maior de eventos de La Niña, ou seja, fase positiva (Figura 2.3b), Santarém mostra uma fase também positiva de chuvas e fase negativa para temperatura, com valores abaixo da média. Santarém mostrou que a umidade relativa do ar, em geral, apresentou comportamento abaixo da média na primeira década, embora seja observado um equilíbrio ($+2.0 \pm 1.5\%$ e $-2,4 \pm 2.1\%$) entre valores positivos e negativos (Figura 2.4f). A partir destas análises, entende-se que Santarém responde melhor à modulação de mecanismos climáticos de grande escala, em relação às variáveis meteorológicas. Apesar do município de Santarém ter apresentado nos últimos 4 anos um avanço no desmatamento (2016-2019), desde o início da série em 2000, a área desmatada anual vem sofrendo uma tendência de queda (INPE, 2020), devido a ação de políticas públicas governamentais, criação de unidades de conservação, mudanças importantes no código florestal, participação de ONG's e da sociedade civil, os quais conseguiram conter esse avanço ao longo de duas décadas, até o ano de 2017 (BISTENE; GUIMARÃES, 2019), fazendo com que Santarém preservasse, em maior parte, suas características naturais. Apesar de uma tendência de aumento no desmatamento nos últimos 8 anos, Castelo, Adami e Santos (2020) consideram que a política de comando e controle do desmatamento na Amazônia (PPCDam), que atualmente se encontra na quarta fase, tem mostrado resultados satisfatórios no que concerne à redução do desmatamento no estado do Pará, incluindo o município de Santarém.

Diferente das tendências das variáveis climáticas observadas na Figura 2.4, a Figura 2.5 mostra que para as demais variáveis ambientais, o município de Marabá apresenta o mesmo sinal das anomalias para os dois longos períodos da série, com fases concordantes. Observa-se que desmatamento e focos de queimadas indicam

concordância para os períodos, com valores majoritariamente positivos na primeira década e negativos na segunda, reforçando a tese de que o aumento das queimadas florestais é consequência, em maior parte, do desmatamento desenfreado que aumenta consideravelmente a vulnerabilidade da floresta ao fogo, conforme mostrou Fearnside (2005). Segundo Rivero et al. (2009), muitos fatores levam ao intenso processo de derrubada e posterior queima da floresta. Para eles, a atividade agrícola e a pecuária, por exigir baixo capital, pouco preparo para o solo, somadas a poucas alternativas econômicas, seriam os dois fatores predominantes. Além disso, o baixo padrão educacional, os fatores culturais arraigados do homem do campo e a escassez de tecnologia, fazem com que o processo de desmatamento e de queimadas se estenda por toda a Amazônia.

Mesmo com a evidente diminuição da densidade de incêndios na floresta amazônica, ao longo da década estudada, o número de focos detectados em Marabá ainda é grande, sempre com valores maiores no segundo semestre, no auge da estação seca (Figura 2.5). Segundo Fearnside (2006), quando o fogo entra na floresta, ele mata as árvores, aumenta a carga de combustível e seca o sub-bosque, elevando o risco de futuras queimadas e da completa degradação da floresta. Ainda de acordo com a Figura 5c, é possível afirmar que a série do AOD também mostra que Marabá apresenta uma fase com valores acima da média na maioria dos meses da primeira década e uma fase negativa na segunda década.

Em relação às internações hospitalares, a Figura 5d mostra que, na primeira década (2000-2009), Marabá apresenta uma fase positiva no número de internações hospitalares, seguida de uma fase negativa na segunda década (2010-2018), fato condizente com as fases mostradas na série do desmatamento, focos de queimadas e também do AOD.

É possível notar que, diferente do que foi visto na série de queimadas, a série do AOD apresenta picos de anomalias positivas na segunda década, mesmo sem picos de queimadas, o que pode ser explicado pela quantidade de aerossóis provenientes de regiões remotas a Marabá via escoamento do vento, como mostrou Kaufman et al. (1998), onde demonstraram que partículas em suspensão fazem trajetórias, via escoamento do vento, de vários quilômetros na atmosfera atingindo regiões remotas ao local de emissão.

Estes resultados mostram evidências de que o número de internações hospitalares em Marabá foi regido pelo aumento da poluição atmosférica por aerossóis

de queimadas, promovido pelo desmatamento em larga escala, não só no município de Marabá, mas em todo o arco do desmatamento, conforme mostrou uma pesquisa feita pela Fiocruz (2019), a qual mapeou o impacto das queimadas e do material particulado para a saúde infantil na região do arco do desmatamento, onde fica localizada Marabá. A pesquisa analisou um ano de amostra e concluiu que o número de internações hospitalares dobrou em áreas com grande densidade de focos de queimadas.

Na análise decadal, a maioria dos anos de toda a série de desmatamento mostra valores abaixo da média para o período (-59 Km^2), principalmente na segunda década, concordando com a série do AOD e internações hospitalares para o mesmo período.

Santarém apresenta diferenças nas análises das mesmas variáveis citadas para Marabá. Neste município, o número de internações hospitalares por doenças respiratórias apresenta uma fase predominantemente positiva na primeira década ($+12,7 \pm 12,3$) e uma fase predominantemente negativa na segunda ($-10,3 \pm 8,9$), mesmo em alguns momentos apresentando anomalias positivas, principalmente no ano de 2013.

Observa-se que esse mesmo comportamento foi observado para as séries históricas de desmatamento e AOD. No entanto, a série de focos de queimadas não apresenta o mesmo comportamento, devido a primeira década apresentar poucos focos de queimadas, sendo a maioria dos meses com o número de focos dentro da média.

Fica constatado, mediante a análise decadal, que o município de Marabá é mais impactado pelo efeito das queimadas locais e provavelmente de municípios vizinhos, fato observado pela concordância nas fases decadais analisadas pela série histórica de queimadas e internações hospitalares, deixando claro que o desmatamento e as queimadas modulam a série de AOD e de internações. Santarém não apresenta a mesma concordância entre as fases decadais, principalmente no que diz respeito ao número de focos de queimadas, o qual é de menor densidade nesta região.

Figura 2.4 - Distribuição dos valores das anomalias mensais de PRP, T, UR para Marabá (4A-C); PRP, T e UR para Santarém (4 D-F), ambas as séries de 2000 a 2017. As curvas tracejadas representam a dominância do sinal das fases positiva e negativa em duas décadas.

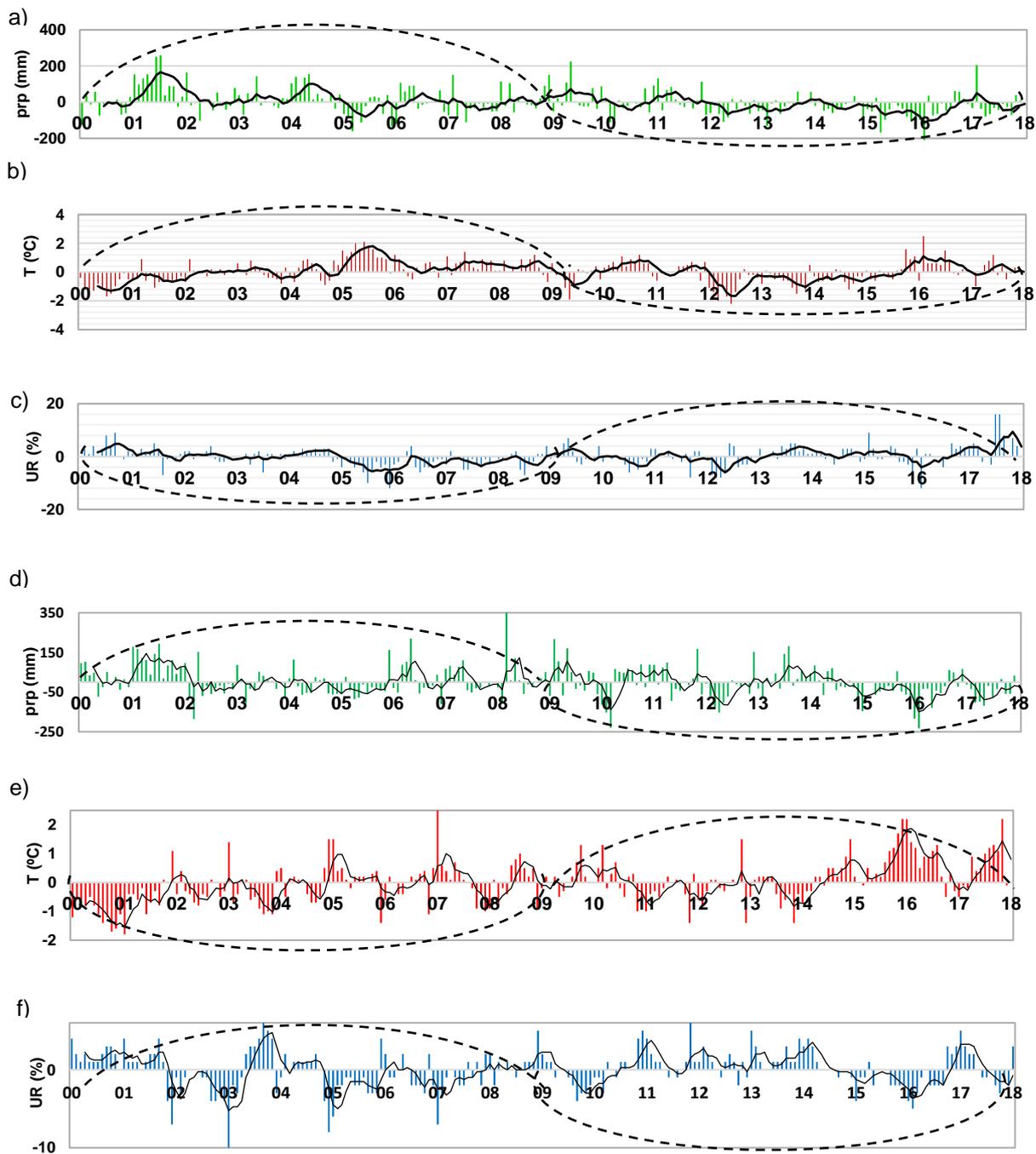
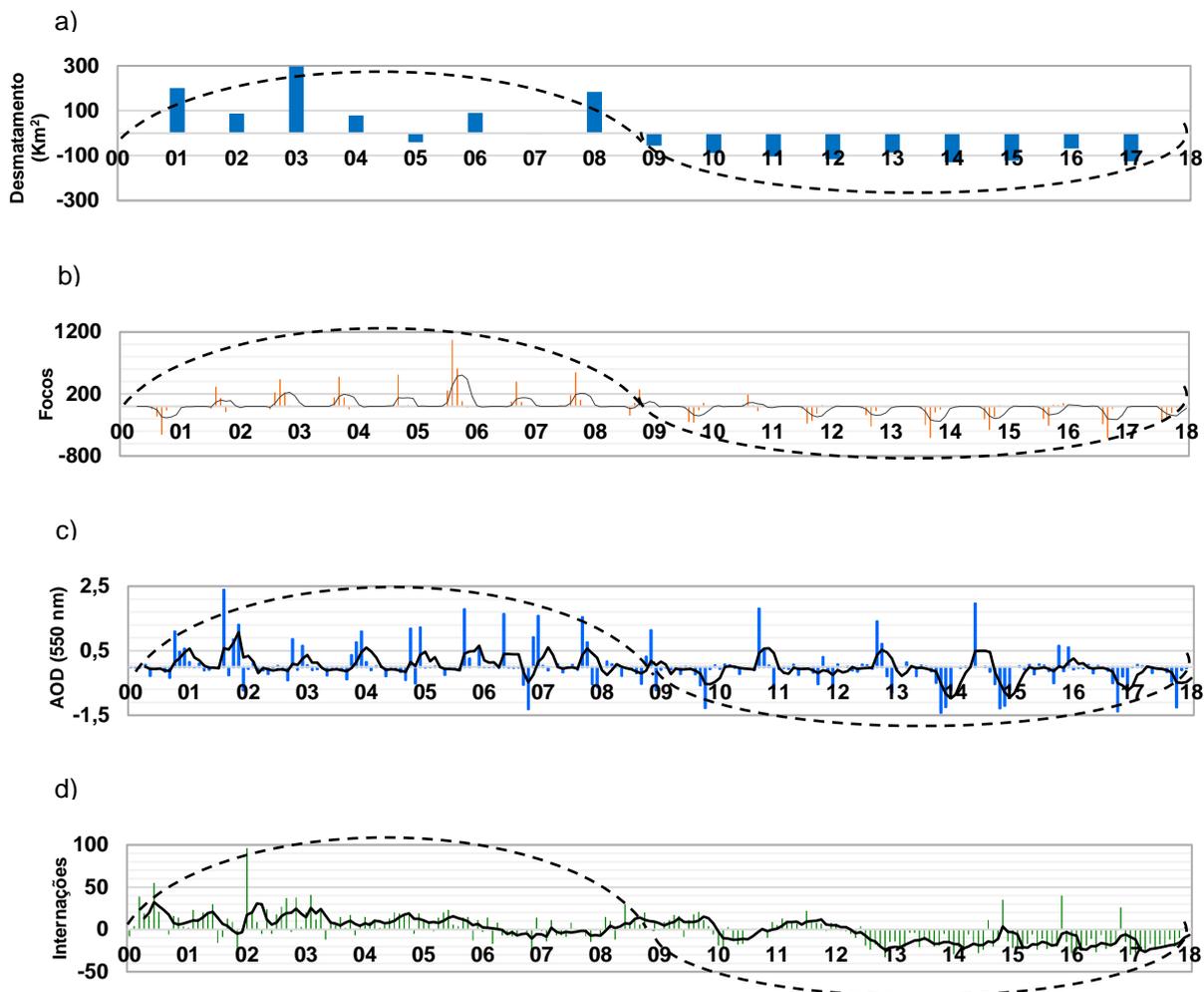


Figura 2.5 – Distribuição dos valores das anomalias mensais das variáveis socioambientais para o município de Marabá no período de 2000 a 2017 (as curvas tracejadas representam a dominância do sinal das fases positivas e negativas; a linha contínua representa a média móvel de 6 meses).



Portanto, o número de internações hospitalares pode estar sendo influenciado pela variação de temperatura e umidade no município (Tabela 2.1), situação que pode aumentar o número de registros de internações hospitalares por doenças respiratórias, devido ao aparecimento de fungos em ambientes fechados, propiciando o surgimento de doenças como asma, como foi exposto por Rosa et al. (2008). Anos mais tarde, Andrade Filho et al. (2013) ao fazerem uma análise sazonal de uma série de internações hospitalares, também constataram que a alta umidade pode influenciar no número de registros por doenças respiratórias. Estes resultados foram confirmados por Smith et al. (2014), onde observaram que o pico de internações hospitalares de crianças acontece no auge da estação chuvosa, devido ao excesso de umidade.

Para o município de Santarém também foram feitos os cálculos das anomalias para as mesmas variáveis socioambientais analisadas anteriormente, como desmatamento, focos de queimadas, AOD e internações hospitalares (Figura 2.6).

Diferentemente de Marabá, não foram constatadas, na série temporal, fases tão coincidentes ao longo do período, mostrando assim uma maior variabilidade dos dados analisados para o município em questão.

Observa-se na Tabela 2.1 que os registros hospitalares por doenças respiratórias apresentam uma média de 32 (± 15.4) crianças internadas na estação chuvosa e 33 (± 11.4) na estação seca, em Marabá, com um aumento de 3% no número de internações de uma estação para outra, enquanto que Santarém apresenta média de 45.8 (± 12.1) e 49.2 (± 16.5) de crianças internadas nas estações chuvosa e seca, respectivamente, mostrando um aumento de 5%.

O valor do AOD segue a mesma tendência de aumento dos focos de queimadas e da temperatura, com aumento significativo no período seco, com maior variação em Marabá, de uma estação para outra (0.38) e menor em Santarém (0.18). O valor do AOD é um indicativo de que a atmosfera local está poluída, pois estima a concentração de aerossóis presentes na coluna atmosférica, através da extinção solar (PAIXÃO, 2011). Outros estudos também mostram aumento tanto do AOD, quanto das queimadas em localidades com alta poluição atmosférica (ROCHA; YAMASOE, 2013).

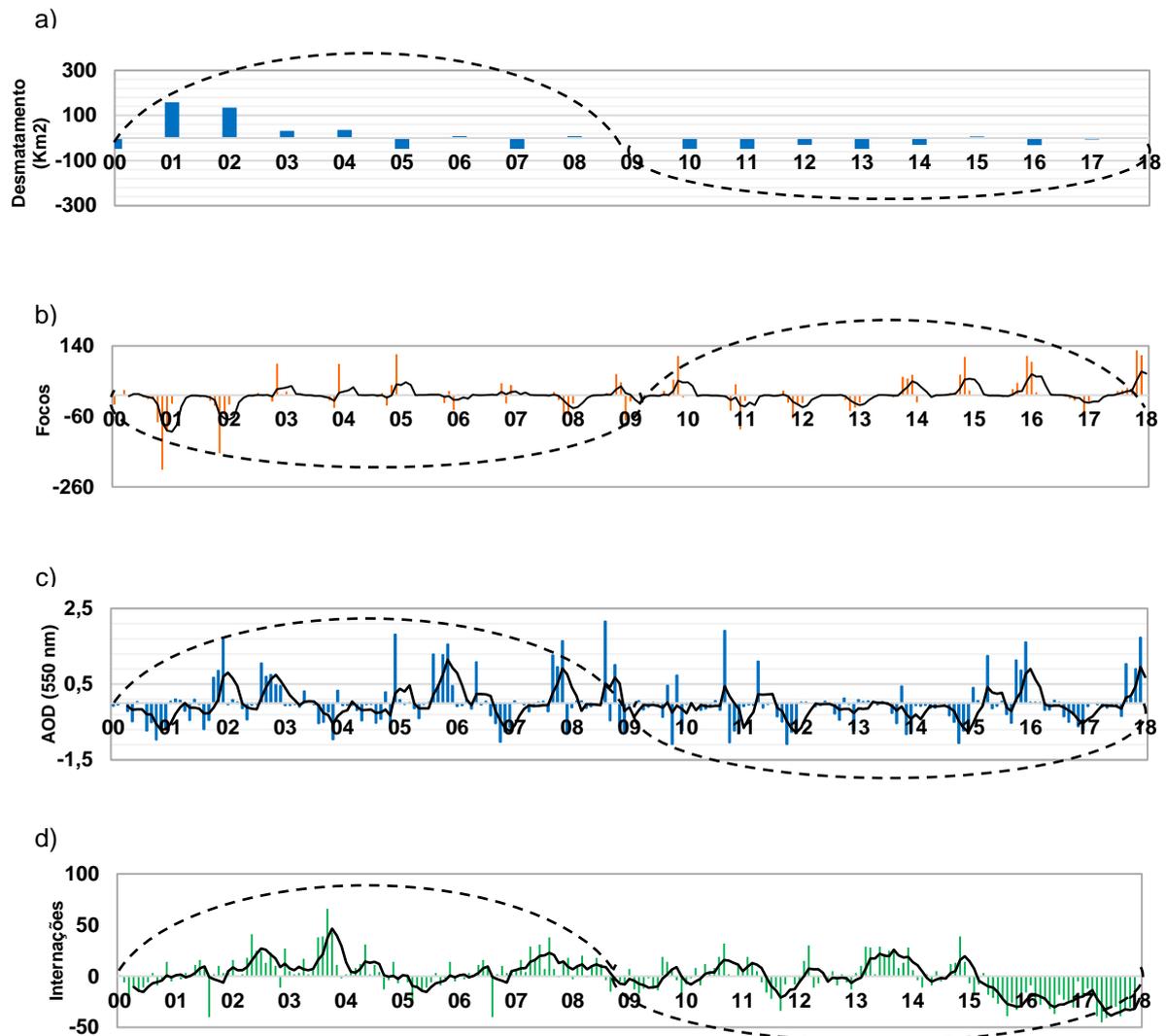
Em relação a temperatura e a umidade, Marabá apresentou temperaturas mais elevadas principalmente na estação seca, com média de 34.4 °C (± 0.7) e também apresentou uma atmosfera menos úmida, com média de apenas 68% (± 4.2) no período seco, apresentando uma amplitude de 12% de uma estação para outra. Santarém se mostrou mais úmida, registrando uma média de 83% (± 2.1) de umidade na estação seca, com uma amplitude bem menor, apenas 7% de uma estação para outra.

A variabilidade mensal do AOD mostra uma coerência entre Marabá e Santarém com valores máximos na estação seca (Figura 2.7). Os dois municípios apresentam maior valor de AOD no segundo semestre de cada ano, porém com maior magnitude para Marabá, em toda a série de dados, com destaque para 2005 e 2015, anos em que ocorreram eventos extremos de clima com estiagens severas e prolongadas na Amazônia (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016; ZENG et al., 2008), onde o valor do AOD chega a 2.0, característico de áreas de florestas com grande número de queimadas.

A Figura 2.8a mostra a relação entre as médias do AOD e da taxa de internação por doenças respiratórias para a estação seca (junho-dezembro) de cada ano estudado, em Marabá. Nota-se ao longo da série, uma nítida diminuição na taxa de internação (linha contínua), à medida que o valor do AOD (linha tracejada) também decresce. É possível verificar a partir de 2010, que o valor do AOD sofre uma queda acentuada,

chegando ao valor médio de 0.60 nm na estação seca de 2017. Estes resultados são coerentes com os valores de anomalias mostrados pelas séries temporais da Figura 2.5, onde Marabá, também a partir de 2009/2010, registra valores abaixo da média, tanto para desmatamento, quanto para queimadas.

Figura 2.6 - Idem figura 2.5, porém para Santarém.



O modelo de regressão linear (Figura 2.8b) mostrou um bom desempenho, com correlação de 64% ao nível de confiança de 95%, provando que o número de casos por doenças respiratórias em crianças menores de 9 anos de idade depende do valor da profundidade óptica do aerossol presente na atmosfera do município de Marabá. Estes resultados são compatíveis com os mostrados por Smith et al. (2014), onde encontraram um aumento significativo no número de registros hospitalares de crianças em

municípios altamente expostos às queimadas florestais, pertencentes ao arco do desmatamento, como é o caso de Marabá. Neste estudo, os autores mostraram que no ano de 2005, ocasião em que a região amazônica sofreu com uma seca severa e prolongada, o AOD foi o principal responsável pela alta incidência de doenças respiratórias nos municípios estudados, o que prova o quanto é nociva a exposição de grupos mais vulneráveis à poluição atmosférica por queimadas florestais.

De maneira similar à análise feita pela Figura 2.8, a Figura 2.9 mostra o comportamento médio das variáveis AOD e taxa de internação somente para a estação seca de cada ano da série de estudo, porém para o município de Santarém. Diferente de Marabá, Santarém não apresentou queda acentuada na taxa de internação por doenças respiratórias, permanecendo em um patamar entre 0,80 e 1,40, mostrando comportamento similar para o valor do AOD. Porém, o modelo de regressão linear (Figura 2.9b) mostrou um grau de dependência entre essas duas variáveis, com 50% de correlação estatística ao nível de confiança de 95%.

A análise feita para o município de Santarém mostra o alto grau de modulação que a poluição por queimadas florestais, representada pelo AOD, tem sobre o número de registros hospitalares por doenças respiratórias. No entanto, apesar de apresentar um menor quantitativo anual de queimadas, em relação a Marabá, o município de Santarém não mostra uma tendência de queda na variabilidade do AOD durante o período de queimadas, o que pode ser explicado pelo aumento da implementação de pastagens para grandes propriedades, estrutura deficiente de órgãos fundiários e de documentações de terras, ao longo da BR-163 (Cuiabá-Santarém), o que facilita o processo de migração de grandes e médios latifundiários para a região em busca de melhores condições em seus empreendimentos (COY; KLINGLER, 2014; SOUZA et al., 2017), sugerindo outras fontes de poluição. Fundamentando esses argumentos, um estudo feito por Castelo et al (2020) mostrou que em mais de uma década, a região do baixo amazonas, no oeste do Pará, onde se localiza o município de Santarém, o desmatamento aumentou, saindo de um nível considerado muito baixo para moderado, segundo pesquisas feitas dentro do próprio município, com auxílio de dados do INPE e do IBGE.

A análise mensal feita pela Figura 2.10, mostra que Marabá é o município que mais queima biomassa florestal, chegando a atingir dez mil focos em setembro, em média. Em geral, para os dois municípios analisados, o número máximo de focos de queimadas e o valor máximo do AOD acontecem no segundo semestre, no período de setembro até novembro. A análise estatística feita com auxílio de gráficos de *boxplot*

mostra que em Marabá há uma amplitude maior no valor do AOD em relação a Santarém, mostrada pela diferença entre os valores máximos e mínimos (0,5 - 2,0) para cada mês, pelo intervalo interquartil (tamanho da caixa) e pelo valor da mediana (1,0) no mês de novembro. Isso demonstra que Marabá apresenta uma maior variabilidade do dado, sendo que Santarém, além de mostrar menor amplitude, também não atinge valores máximos próximos aos encontrados em Marabá, tanto para focos de queimadas, como para o AOD.

Tabela 2.1 – Análise estatística descritiva sazonal das variáveis estudadas para os dois municípios pesquisados, onde DP: desvio padrão; P: percentil; MAX: valor máximo; MIN: valor mínimo (2000-2017).

	MÉDIA (DP)	MÍN	P25	P50	P75	MÁX
MARABÁ						
Estação chuvosa						
Internações < 9 anos	32 (15.4)	8.0	18.0	33.0	45.0	61.0
Temperatura (°C)	32.4 (0.6)	31.2	32.1	32.6	32.7	33.8
Umidade (%)	80 (2.4)	73.0	79.0	81.0	81	84.0
AOD (550 nm)	0.28 (0.03)	0.24	0.27	0.28	0.29	0.33
Queimadas	0.7 (0.8)	0.0				2.8
Estação seca						
Internações < 9 anos	33 (11.4)	15.0	18.0	32.0	44	50.0
Temperatura (°C)	34.4 (0.7)	33.3	34.0	34.5	34.9	35.5
Umidade (%)	68 (4.2)	65.0	65.0	67.0	69.8	82.0
AOD (550 nm)	0.66 (0.69)	0.21	0.27	0.35	0.79	2.9
Queimadas	188.5 (166.0)	45.9	155	346	484	475.1
SANTARÉM						
Estação chuvosa						
Internações < 9 anos	45.8 (12.1)	19.4	26.0	43.0	57.0	61.4
Temperatura (°C)	30.2 (0.4)	29.6	29.9	30.1	30.4	31.2
Umidade (%)	90 (1.0)	89.0	90.0	91.0	91.0	92.0
AOD (550 nm)	0.29 (0.03)	0.25	0.28	0.29	0.31	0.35
Queimadas	6.0 (8.0)	0.0				27.6
Estação seca						
Internações < 9 anos	49.2 (16.5)	16.9	29.0	39.0	53.0	78.0
Temperatura (°C)	32.7 (0.7)	31.2	32.3	32.5	32.5	34.1
Umidade (%)	83 (2.1)	80.0	81.0	83.0	84.0	88.0
AOD (550 nm)	0.47 (0.48)	0.31	0.32	0.35	0.39	2.39
Queimadas	68.7 (25.3)	8.9	73	87	114	111.0

Figura 2.7 - Variabilidade dos valores mensais da profundidade óptica do aerossol (AOD), a partir dos dados do MODIS para os municípios de Marabá (azul); Santarém (verde) no período de 2000 a 2017.

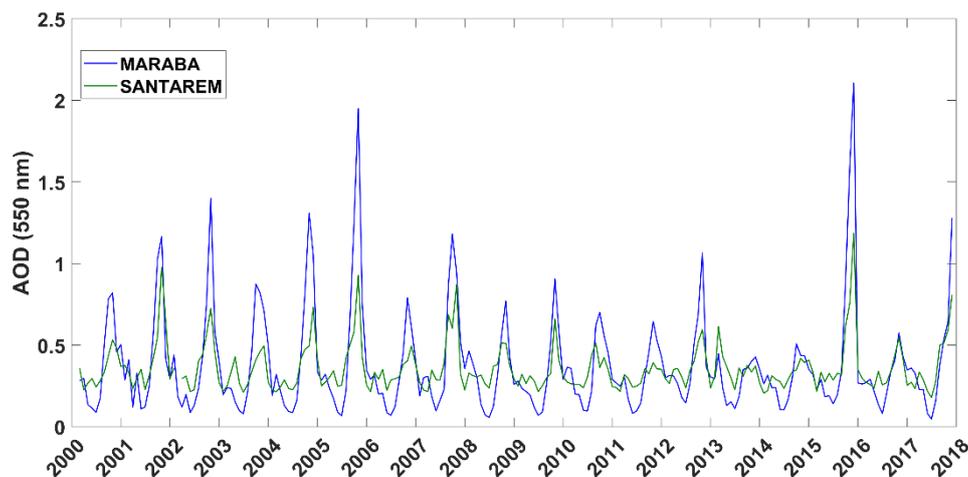
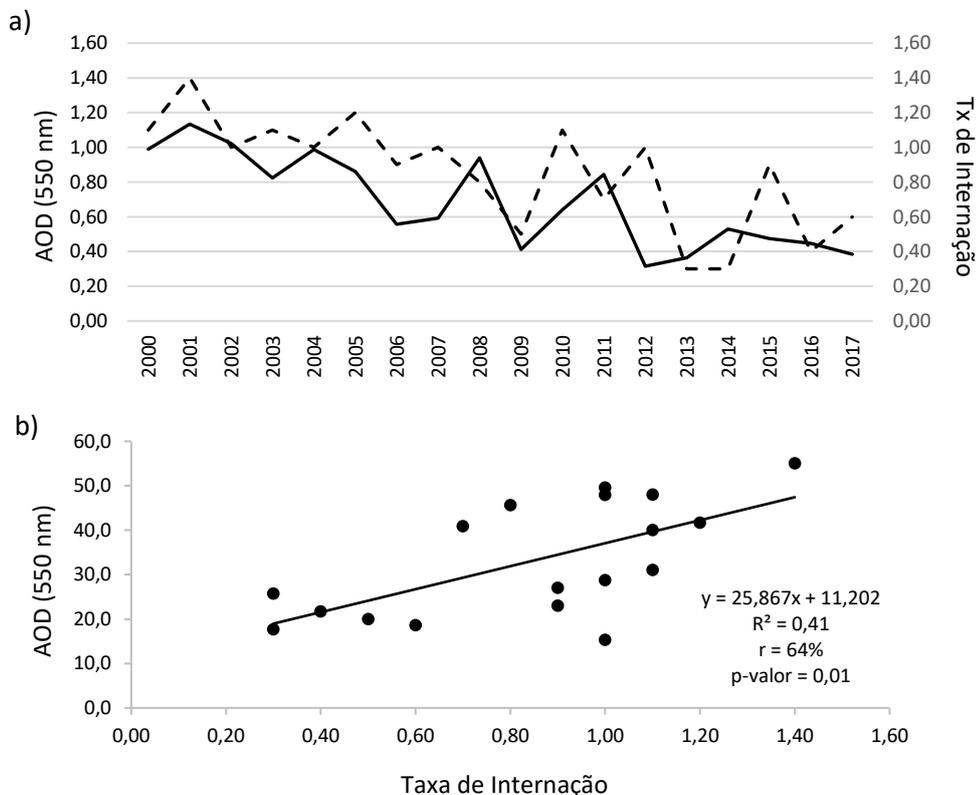
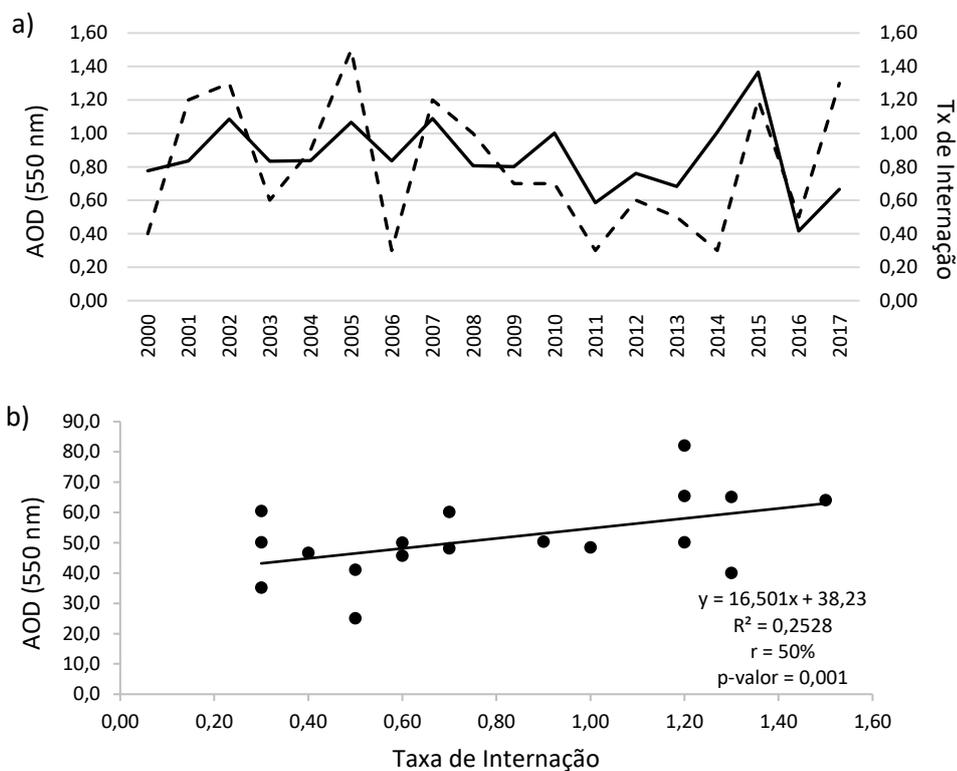


Figura 2.8 – Correlação entre AOD e taxa de internação hospitalar em menores de 9 anos de idade por 1000 habitantes, em Marabá: a) variabilidade média do AOD (tracejado) e da taxa de internação (contínuo) durante a estação seca para cada ano da série de estudo; b) modelo de regressão linear entre AOD e taxa de internação, com p -valor $< 0,05$ e intervalo de confiança de 95%, para a média da estação seca de cada ano da série de estudo.



Ainda na Figura 2.10 é possível observar que a análise conjunta da média mensal do número de focos de queimadas com o AOD, mostra uma defasagem no tempo entre os picos máximos das queimadas e do AOD. No caso de Marabá, a defasagem no tempo chega a 2 meses, com o maior número de queimadas em setembro, seguido do maior valor do AOD em novembro. Santarém não apresenta defasagem em relação a essas duas variáveis, com picos tanto de queimadas, como de AOD, em novembro.

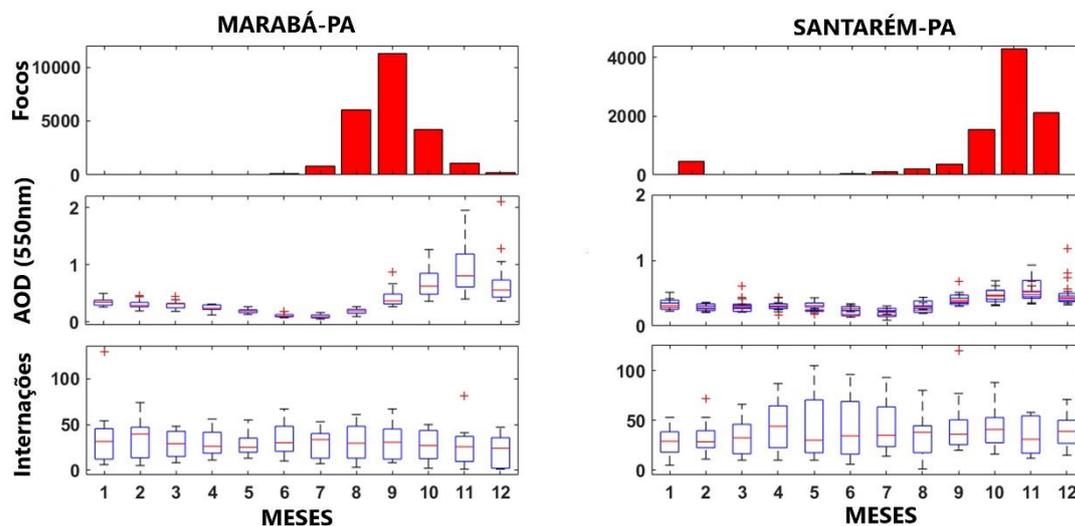
Figura 2.9 – Correlação entre AOD e taxa de internação hospitalar em menores de 9 anos de idade por 1000 habitantes, em Santarém: a) variabilidade média do AOD (tracejado) e da taxa de internação (contínuo) durante a estação seca para cada ano da série de estudo; b) modelo de regressão linear entre AOD e taxa de internação, com p -valor $< 0,05$ e intervalo de confiança de 95%, para a média da estação seca de cada ano da série de estudo.



A defasagem no tempo pode ser explicada pela presença de outros tipos de aerossóis emitidos através do processo de mineração que permanecem presentes na atmosfera, mesmo depois do pico da queimada na região de Marabá. Essa grande presença de aerossóis de minérios na atmosfera, foi mostrada por Barroso et al. (2021) que constataram a presença de material particulado na forma de sulfetos, sulfatos, silicatos e carbonatos, acima das diretrizes estabelecidas para regiões de intensa atividade mineradora. Esses autores concluíram que há uma forte correlação entre o

aerossol suspenso na atmosfera e o minério encontrado no solo contaminado. Vale ressaltar que grandes empresas localizadas no município de Marabá fazem a medição do material particulado em superfície, porém não foram fornecidos para auxiliar neste estudo. Outro fator que pode contribuir para esta defasagem entre os picos de queimadas e o AOD é o transporte de aerossóis de regiões remotas que registram um grande número de queimadas, neste caso, o município de Marabá pode ser influenciado por municípios vizinhos, como mostrou Nascimento e Medeiros (2012) em um estudo feito para o estado do Mato Grosso, em que grandes quantidades de aerossóis podem atingir quilômetros de distância na horizontal, via escoamento do vento, afetando regiões remotas de forma significativa, incluindo o número de internações hospitalares, no entanto é preciso levar em consideração o número máximo de internações em Santarém no mês de maio, no final da estação chuvosa, onde há poucos registros de focos de queimadas, o que pode ser ocasionado por outros fatores como os climáticos, que também levam ao atendimento hospitalar na região (ANDRADE FILHO et al., 2013; SILVA et al., 2013).

Figura 2.10 – Informações estatísticas representadas por histogramas e box-plot da análise conjunta da média mensal dos focos de queimadas, AOD e internações hospitalares para Marabá e Santarém de 2000 a 2017.



2.4 Conclusões

O intuito desta pesquisa foi demonstrar a importância da preservação ambiental, tendo em vista como localidades com características naturais bastante diferentes respondem às oscilações climáticas e às ações antrópicas em relação ao meio ambiente.

A análise decadal das séries temporais aponta o avanço do desmatamento como a causa primária para o processo de queimadas e, conseqüentemente, a poluição atmosférica que agrava o surgimento de doenças respiratórias.

As oscilações climáticas representadas pelos índices IOS e MMA, do Pacífico e Atlântico, respectivamente, modulam as variáveis ambientais que, por sua vez, modulam variáveis sociais, incluindo a saúde humana, porém as características naturais locais são fundamentais nesse processo de modulação, como ficou constatado pelos diferentes sinais das fases decadais entre Marabá e Santarém, municípios localizados em regiões com características naturais diferentes.

Constata-se que as queimadas têm importante contribuição para o aumento das internações hospitalares, pois a análise de regressão mostrou associação estatisticamente significativa entre a taxa de internação hospitalar e o AOD, para os dois municípios estudados, porém com correlação mais forte em Marabá, acima de 60%. Em outras palavras, ao longo do período seco, quanto maior o número de focos de incêndio florestal, maior a taxa de internação por doenças respiratórias em crianças até 9 anos de idade.

Conclui-se que, dos dois municípios estudados, Marabá apresenta o maior número de queimadas florestais, uma atmosfera mais poluída, seca e também o maior valor de AOD, principal indicativo da presença do aerossol na atmosfera local. Essas observações ficam evidentes mediante análise estatística mensal, porém apresentando uma defasagem de tempo entre os picos da queimada e do AOD, mostrando a presença de outros tipos de aerossóis, como o de mineração, atividade bastante desenvolvida por grandes mineradoras presentes na região sudeste do Pará.

A análise estatística dos dados em escala sazonal nos permite concluir que tanto Santarém, quanto Marabá apresentam aumento no número de internações hospitalares por doenças respiratórias, 3% e 5%, respectivamente, durante a estação seca em comparação a estação chuvosa. No segundo semestre, esse crescimento acontece de forma conjunta ao aumento no número de focos de queimadas e no valor da profundidade óptica do aerossol (AOD).

Este estudo demonstra a importância de ações governamentais no sentido de mitigar problemas na saúde pública, melhorando a qualidade de vida, mediante o processo de mudanças do clima e da destruição da floresta provocada pelo desmatamento ilegal, principalmente na região do arco do desmatamento na Amazônia Legal, em meio a um cenário de aumento de incêndios florestais nos últimos dois anos e com tendência crescente para os próximos anos. Se houver ações sinérgicas e planejadas para minimização de problemas ambientais, os gastos com tratamento de saúde diminuirão principalmente em regiões mais vulneráveis. Uma análise mais aprofundada sobre o PM_{2.5} presente na atmosfera destes municípios será apresentada em um próximo estudo.

REFERÊNCIAS

ALVES, N.; BRITO, J.; CAUMO, S.; ARANA, A.; HACON, S.; ARTAXO, P.; Vasconcellos, C. Biomass burning in the Amazon region: Aerosol source apportionment and associated health risk assessment. **Atmospheric Environment**, v. 120, p. 277-285, 2015.

ALVES, N.; VESSONI, A.; QUINET, A.; FORTUNATO, R.; KAJITANI, G.; PEIXOTO, M.; MEDEIROS, S. Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p.1-13, 2017.

ANDRADE FILHO, V.; ARTAXO, P.; HACON, S.; CARMO, C.; CIRINO, G. Aerossóis de queimadas e doenças respiratórias em crianças, Manaus, Brasil. **Revista de Saúde Pública**, v. 47, p. 239-247, 2013.

ANDREÃO, W.; ALBUQUERQUE, T. Fine particles as a public health indicator in Brazil: from monitoring to modeling. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 13, n. 12, p. 1-11, 2020.

ARAÚJO, R.; ANDREOLI, R.; CANDIDO, L.; KAYANO, M.; SOUZA, R. A influência do evento El Niño-Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 4, p. 469-480, 2013.

BANDEIRA CASTELO, T.; ADAMI, M.; NASCIMENTO DOS SANTOS, R. Fronteira Agrícola e a política de priorização dos municípios no combate ao desmatamento no estado do Pará, Amazônia. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 28, n. 2, p. 434-457, 2020.

BARROSO, A.; MOGO, S.; SILVA, M.; CACHORRO, V.; DE FRUTOS, Á. Morphology, Mineralogy, and Chemistry of Atmospheric Aerosols Nearby an Active Mining Area: Aljustrel Mine (SW Portugal). **Atmosphere**, v. 12, n. 3, p. 333, 2021.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ): BARCELLOS, C.; XAVIER, D.; HACON, S.; ARTAXO, P.; MAGALHÃES, M.; MATOS, V.; FEITOSA, P. Queimadas na Amazônia e seus impactos na saúde: a incidência de doenças respiratórias no sul da Amazônia aumentou. **Observatório de Clima e Saúde**, Fundação Oswaldo Cruz (FioCruz), 2019. (3º Informe técnico do Observatório de Clima e Saúde).

BISTENE, M.; GUIMARÃES, J. Desmatamento, população e desenvolvimento econômico no oeste do Pará nos eixos das Rodovias Santarém-Cuiabá e Transamazônica. **Natural Resources**, v. 9, n. 2, p. 19-35, 2019.

COUTINHO, C.; ROCHA, E.; LIMA, A.; RIBEIRO, H.; GUTIERREZ, L.; BARBOSA, A.; TAVARES, P. Variabilidade Climática da Precipitação na Bacia Amazônica Brasileira. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, n. 14, p. 476-500, 2018.

COY, M.; KINGLER, M. Frentes pioneiras em transformação: o eixo da BR-163 e os desafios socioambientais, 2014. **Revista Territórios e Fronteiras**, v. 7, p. 1-26, 2014.

DAVIDSON, E.; ARAUJO, A.; ARTAXO, P.; BALCH, J. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321-328, 2012.

DONALDSON, K.; POLAND, C. A. Inhaled nanoparticles and lung cancer - what we can learn from conventional particle toxicology. **Swiss Medical Wkly**, v. 142, p. w13547, 2012.

DEBORTOLI, N.; DUBREUIL, V.; HIROTA, M.; FILHO, S.; LINDOSO, D.; NABUCET, J. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 6, p. 2889-2900, 2017.

Di NICOLANTONIO, W.; CACCIARI, A.; TOMASI, C. Particulate matter at surface: Northern Italy monitoring based on satellite remote sensing, meteorological fields, and in-situ samplings. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 284-292, 2009.

DUARTE, C.; SOUZA, S.; GALVÍNCIO, J.; MELO, I. Detecção de mudanças na cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Tapacurá –PE através da análise por componentes principais. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal, 2009. p. 5765-5772.

FEARNSIDE, P. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 113-123, 2005.

FEARNSIDE, P. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazônica**, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

FORASTIERE, F.; STAFOGGIA, M.; TASCO, C.; PICCIOTTO, S.; AGABITI, N.; CESARONI, G. Socioeconomic status, particulate air pollution, and daily mortality: differential exposure or differential susceptibility. **American Journal of Industrial Medicine**, v. 50, n. 3, p. 208-16, 2007.

GONÇALVES, F.; BEHENG, K.; MASSAMBANI, O.; VAUTZ, W.; KLOCKOW, D. Processos de remoção de material particulado atmosférico: uma modelagem numérica de estudo de casos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, p. 437-447, 2010.

GONÇALVES, K.; CASTRO, H.; HACON, S. As queimadas na região amazônica e o adoecimento respiratório. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1523-1532, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS- INPE. Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal. São José dos Campos: INPE, 2020. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes>. Acesso em: 14 de abril de 2021.

JESUS, L.; VITORINO, M.I.; SILVA SANTOS, M. Modulação climática da precipitação na produção de caranguejo do estuário paraense. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 4, p. 993-1001, 2017.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; Takahashi, K.; Malhi, Y.; Van Der Schrier, G. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, n. 33130, p. 1-6, 2016.

KAUFMAN, Y.; HOBBS, P.; KIRCHHOFF, V.; ARTAXO, P.; REMER, L.; HOLBEN, B.; MATTOS, L. Smoke, clouds, and radiation-Brazil (SCAR-B) experiment. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 103, n. 24, p. 31783-31808, 1998.

KAYANO, M.; ANDREOLI, R.; SOUZA, R. El niño–southern oscillation related teleconnections over south America under distinct atlantic multidecadal oscillation and pacific interdecadal oscillation backgrounds: La Niña. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1359-1372, 2019.

LEÃO, C.E.G.; ANDRADE, E.S.D.; FABRINI, D.S.; OLIVEIRA, R.A.D.; MACHADO, G.L.B.; GONTIJO, L.C. Epidemiologia das queimaduras no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Cirurgia Plástica**, v. 26, n. 4, p. 573-577, 2011.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 20, n. 3, p. 657-675, 2016.

LYAPUSTIN, A.; WANG, Y.; KORKIN, S.; HUANG, D. MODIS Collection 6 MAIAC algorithm. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 11, n. 10, p. 5741-5765, 2018.

MILLER, G.; SPOOLMAN, S. **Ciência ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2015. 576 p.

NASCIMENTO, L.; MEDEIROS, A. Admissions due to pneumonia and biomass burning: a spatial approach. **Jornal de Pediatria**, v. 88, n. 2, p. 177-183, 2012.

PADILLA, C.; KIHAL-TALANTIKITE, W.; VIEIRA, V.; ROSSELO, P.; LE, N.; ZMIROU-NAVIER, D. Air quality and social deprivation in four French metropolitan areas – A localized spatiotemporal environmental inequality analysis. **Environmental Research**, v. 134, p. 315-24, 2014.

PAIXÃO, M. **Propriedades ópticas de aerossóis naturais e de queimadas da Amazônia**. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: www.teses.usp.br. Acesso em: 03 de julho de 2017.

PEREIRA, H.; REBOITA, M.; AMBRIZZI, T. Características da atmosfera na primavera austral durante o El Niño de 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n.2, p.293-310, 2017.

PIRES, G.; COSTA, M. Deforestation causes different subregional effects on the Amazon bioclimatic equilibrium. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n.14, p. 3618-3623, 2013.

RIVERO, S.; ALMEIDA, O.; ÁVILA, S.; OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, v. 19, n.1, p. 41-66, 2009.

ROCHA, V.; CORREIA, F.; FONSECA, P. Reciclagem de precipitação na Amazônia: Um estudo de revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n.1, p.59-70, 2015.

ROCHA, V.; YAMASOE, M. Estudo da variabilidade espacial e temporal da profundidade óptica do aerossol obtida com o MODIS sobre a região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n.2, p. 210-220, 2013.

RODRIGUES, P.; IGNOTTI, E.; HACON, S. Fatores socioeconômicos aumentam os efeitos nocivos da poluição atmosférica e da temperatura na mortalidade. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v.22, p. 523-532, 2019.

ROSA, A.; IGNOTTI, E.; BOTELHO, C.; CASTRO, H.; HACON, S. Doença respiratória e sazonalidade climática em menores de 15 anos em um município da Amazônia Brasileira. **Jornal de Pediatria**, v. 84, n.6, p. 543-9, 2008.

ROZANTE, J.; MOREIRA, D.; GONCALVES, L.; VILA, D. Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and forecasting**, v. 25, n.3, p. 885-894, 2010.

SEIXAS, I.; DA SILVA PINHEIRO, E. Sensoriamento remoto aplicado à análise chuva-vegetação na Amazônia Central. **GEOUSP Espaço E Tempo** (Online), v. 18, n.3, p.635-649, 2014.

SEWARD, L.; DOANE, D. **Estatística aplicada à administração e economia-4**. Estados Unidos: AMGH editor, 2019. 600 p.

SILVA, A.; MATTOS, I.; IGNOTTI, E.; HACON, S. Material particulado orinário de queimadas e doenças respiratórias. **Revista de Saúde Pública**, n.2, v.47, p.345-52, 2013.

SMITH, L.; ARAGÃO, L.; SABEL, C.; NAKAYA, T. Drought impacts on children's respiratory health in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v.4, n.1, p.1-8, 2014.

SOUSA, A.; CANDIDO, L.; ANDREOLI, R. Variabilidade interanual da precipitação e fluxo de umidade sobre a Amazônia usando o QTCM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n.1, p.41-56, 2018.

SOUZA, A.; PONTES, N.; ADAMI, M.; NARVAES, S. A Contribuição das estradas e o padrão de desflorestamento e degradação da cobertura florestal no sudoeste paraense. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.69, v.9, p.1833-1846, 2017.

VAN DONKELAAR, A.; MARTIN, R.; BRAUER, M.; KAHN, R.; LEVY, R.; VERDUZCO, C.; VILLENEUVE, P.J. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: Development and application. **Environmental Health Perspectives**, v. 118, n.6, p.847–855, 2010.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air pollution and child health: prescribing clean air: summary**. World Health Organization, 2018. <https://www.who.int/>. Acesso em: 30 de novembro de 2021.

ZENG, N.; YOON, J.; MARENGO, J.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, v. 3, n.1, p.1-9, 2008.

CAPÍTULO 3 IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E SOCIAIS DE EXTREMOS CLIMÁTICOS NA POLUIÇÃO DO AR POR MATERIAL PARTICULADO FINO DE QUEIMADAS EM ÁREAS URBANAS NA AMAZÔNIA

RESUMO

Mudanças ambientais provocadas por alterações do clima podem potencializar problemas de saúde, principalmente em regiões mais vulneráveis nos âmbitos social e econômico. Este estudo teve como objetivo a investigação da relação entre poluentes atmosféricos (PM_{2.5}), queimadas florestais e doenças respiratórias em um grupo populacional específico com idade entre 1 e 9 anos, mediante eventos climáticos classificados na literatura como severos em relação às alterações provocadas no meio ambiente, como estiagens prologadas, cheias e no comportamento de variáveis meteorológicas. Foram analisados dados de focos de queimadas, PM_{2.5}, TSM do Pacífico e Atlântico, precipitação e saúde para os anos específicos de 2005, 2010, 2014 e 2015. Nossas análises mostraram que o fator climático é fundamental no entendimento do processo de poluição por aerossóis de queimadas, no entanto, apesar da comprovada contribuição do clima no aumento das queimadas, ficou evidente que o aumento da poluição do ar pode ser potencializado por outros fatores como localização geográfica, políticas públicas e vulnerabilidade social. Nossos resultados mostraram que anos sem extremos climáticos, como 2014, podem registrar um grande número de queimadas, assim como eventualmente, anos anômalos como 2005 e 2015, podem não mostrar correlação estatística, com efeitos sobre a saúde. A componente geográfica se mostrou fundamental para entendimento das implicações promovidas pelo clima, tendo em vista que Marabá, localizada mais a leste da área de estudo, percebe com mais intensidade os efeitos de anomalias climáticas do Atlântico, enquanto que Santarém a oeste, responde mais às mudanças do Pacífico, com dois meses de defasagem no tempo em relação aos efeitos ambientais, Marabá em setembro e Santarém em novembro.

Palavras-chave: clima; Pacífico; Atlântico; poluição; saúde.

*Artigo em processo de confecção e tradução para ser submetido a periódico científico.

ABSTRACT

Environmental changes caused by climate change can increase health problems, especially in socially and economically vulnerable regions. This study aimed to investigate the relationship between air pollutants (PM_{2.5}), forest fires and respiratory diseases in a specific population group aged between 1 and 9 years, through climatic events classified in the literature as severe in relation to the changes caused in the environment, such as prolonged droughts, floods and the behavior of meteorological variables. Data from fire outbreaks, PM_{2.5}, Pacific and Atlantic SST, precipitation and public health were analyzed for the specific years 2005, 2010, 2014 and 2015. Our analyzes show that the climatic factor is fundamental in understanding the pollution process by aerosols from fires, however, despite the proven contribution of the climate to the increase in fires, it is evident that the increase in air pollution can be enhanced by other factors such as geographic location, public policies and social vulnerability. Our results showed that years without climatic extremes, such as 2014, may register a large number of fires, as well as, occasionally, anomalous years such as 2005 and 2015 may not show statistical correlation with effects on health. The geographic component proved to be fundamental for understanding the implications caused by the climate, considering that Maraba, located further east of the study area, perceives the effects of Atlantic climatic anomalies more intensely, while Santarem, to the west, responds more to changes in the Pacific, with a two-month lag in time in relation to environmental effects, Maraba in September and Santarem in November.

Keywords: climate; Pacific; Atlantic; pollution; health.

3.1 Introdução

Recentemente muitos estudos têm investigado com mais profundidade a relação entre mudanças do clima e saúde humana, tendo em vista que essa relação pode ser causada por diversos fatores, antrópicos ou naturais, bem como em diversas escalas de tempo e espaço. Muitos autores consideram os efeitos do clima sobre a saúde como um processo bastante complexo e não linear, pois variam geograficamente em função do ambiente, da topografia e da extrema vulnerabilidade das mazelas da sociedade (McMICHAEL, 2003; PARKS, 2016). Portanto, pesquisas com esta temática precisam ter uma abordagem interdisciplinar e integrada no sentido de diagnosticar e apontar possíveis soluções ao problema.

Antes das consequências das mudanças do clima alcançarem a vida das pessoas, o ambiente percebe antecipadamente os reflexos desta variabilidade. Estudos mostram que eventos severos de clima têm potencial para provocar alterações nos ecossistemas e no ciclo hidrológico, com significativas perdas na biodiversidade e na qualidade da água, afetando assim a produção de alimentos (BARCELLOS et al., 2009). Além disso, eventos extremos de seca também podem deixar a vegetação mais suscetível ao fogo, fato que somado à ação humana gera grande quantidade de incêndios florestais, diminuindo a qualidade do ar nos centros urbanos.

Um dos fenômenos bastante relatados em diversos estudos é o El Niño Oscilação Sul (ENOS), de acoplamento oceano-atmosfera, composto por duas fases, El Niño que é caracterizado pelo aquecimento das águas do Pacífico equatorial e La Niña caracterizada pelo resfriamento da mesma (PEREIRA et al., 2017). Barbosa e Fearnside (1999) constataram que durante o episódio do El Niño 1997/1998, o noroeste da Amazônia sofreu graves consequências com o alto número de queimadas sem precedentes e atribuíram o El Niño como agente maximizador dos danos ambientais e sociais causados.

Outro fenômeno climático que pode causar sérias mudanças ambientais na Amazônia é o gradiente térmico inter-hemisférico, conhecido na literatura como dipolo do Atlântico, composto também por duas fases, positiva e negativa, sendo a primeira desfavorável às chuvas na Amazônia, como ocorreu em 2005, quando a região sofreu com uma severa estiagem, com grandes impactos ambientais (MARENGO et al., 2008).

Além dos eventos climáticos, estudos apontam que o desmatamento é a principal causa antrópica das queimadas florestais, com consequências drásticas para o meio

ambiente e para a saúde humana (SMITH et al., 2014). Este desmatamento, em geral, resulta em queimadas iniciadas de forma ilegal, logo após a remoção de árvores de elevado valor no mercado, sendo que outras atividades também merecem destaque nesse processo como a pecuária extensiva, a agricultura, a mineração e a especulação de terras (NEPSTED et al., 2014; THONICKE et al., 2001).

Na fuligem oriunda dos incêndios florestais, encontram-se aerossóis em suspensão na atmosfera, podendo ser originários de fontes naturais e antrópicas. Muitos estudos têm relatado que, particularmente, os aerossóis de origem antropogênica são considerados nocivos para a saúde humana, sendo que os mesmos têm demonstrado uma forte relação entre morbidade e partículas com diâmetro $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}), os quais permanecem por mais tempo em suspensão no ar, em relação às partículas de diâmetro maior. Este material particulado fino é o principal componente da fumaça de incêndios florestais e penetra facilmente nos pulmões, logo são encontrados principalmente em regiões de intenso processo de queimadas (ALVES et al., 2017; GONÇALVES et al., 2018).

Apesar de alguns estudos mostrarem um aumento significativo na poluição do ar em decorrência das queimadas florestais na última década, ainda há uma escassez de pesquisas voltadas para a região amazônica, principalmente na parte leste, onde a população de muitas cidades em pleno desenvolvimento econômico sofre com a baixa qualidade do ar. Andreão et al. (2020) fizeram um levantamento epidemiológico de estudos realizados nos últimos dez anos sobre o PM_{2.5}, discutindo o uso do monitoramento e da modelagem de dados para esta finalidade. Eles constataram que a maioria dos estudos se concentra nas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil e que em grande parte da Amazônia não há uma rede de monitoramento da qualidade do ar nas regiões mais críticas, no que se refere ao desmatamento e as queimadas, como na parte leste do Pará.

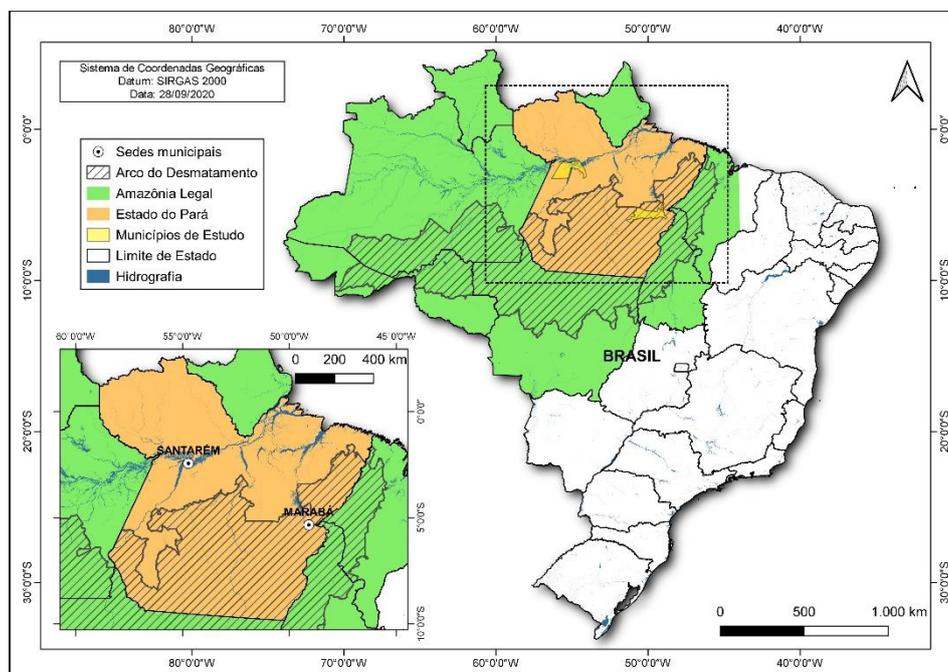
Diante do aumento alarmante do processo de queimadas nos últimos anos e, conseqüentemente, da poluição atmosférica em localidades mais vulneráveis, este estudo tem como objetivo investigar a relação entre o material particulado fino (PM_{2.5}) proveniente de queimadas florestais e casos de internação por doenças respiratórias nos municípios de Marabá e Santarém, ambos localizadas no estado do Pará.

3.2 Material e Métodos

Assim como no capítulo anterior, a área de estudo escolhida para esta pesquisa foi o estado do Pará, na Amazônia oriental, mais especificamente nos municípios de Marabá e Santarém. A escolha destes municípios foi feita com base na localização em áreas com características bastante diferentes do estado do Pará, como resultado da ação humana de décadas na região: uma área representativa de floresta nativa da Amazônia central (Santarém) e outra representativa da região do arco do desmatamento (Marabá), apesar de ambos os municípios estarem situados no mesmo bioma brasileiro.

A Figura 3.1 mostra a localização dos municípios de Marabá e Santarém, bem como a abrangência do arco do desmatamento em toda a Amazônia legal que engloba todo o município de Marabá, no sudeste do estado. É possível observar ainda que a área do arco do desmatamento já constitui quase metade da área total do estado, área que há décadas sofre com profundas alterações no padrão do uso da terra que podem amplificar ainda mais os efeitos da variabilidade do clima na Amazônia (NEPSTAD et al., 2014; NOBRE et al., 2007).

Figura 3.1 - Mapa da área de estudo com ênfase no estado do Pará, onde os municípios de Marabá e Santarém estão localizados. A imagem inclui a Amazônia Legal (verde) e o arco do desmatamento (hachurado).



O banco de dados deste capítulo foi composto pelas mesmas medidas de focos de queimadas do capítulo 2, porém na escala diária. Os satélites detectam focos dentro da área estabelecida dos municípios, com resolução de 1 Km, portanto um foco de queimada de algumas dezenas de metros quadrados será registrado como tendo pelo menos 1 Km² de área total, com duas medidas diárias, levando em consideração os satélites de referência (TOMZHINSKI et al., 2011).

Além dos dados de focos de queimadas, foram incluídos ao banco de dados estimativas de PM_{2.5}, medidos em quatro horários por dia (00, 06, 12 e 18 UTC), mas que aqui foram transformadas em medidas diárias para os locais escolhidos. Esses dados foram fornecidos pela plataforma *online* do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde (SISAM), que fornece estimativas de diversas variáveis ambientais, com resolução espacial de 12,5 Km, como produto de saída dos modelos atmosféricos MERRA-2 (2000-2002), CAMS-*Reanalysis* (2003-2007) e CAMS-*Nrealtime* (2018-2019), para as células de pontos de grade que contém a localização da sede de cada município, conforme mostrou Bosilovich et al. (2016).

Os dados de internações hospitalares por doenças respiratórias também foram os mesmos usados no capítulo 2, assim como o grupo populacional na faixa etária de 1 a 9 anos, residentes nos municípios escolhidos.

Também foram incluídos dados de anomalias mensais de temperatura da superfície do mar (TSM), fornecida pelo Climate Prediction Center / National Oceanic and Atmospheric Administration (CPC/NOAA), a fim de se investigar a configuração espacial de cada evento escolhido.

A partir da complementação do banco de dados, selecionou-se quatro anos, sendo três com episódios de eventos extremos e um considerado normal pela literatura, como mostra a Tabela 3.1.

Foi construído um modelo estatístico de regressão linear em duas etapas, onde na primeira etapa, a variável dependente (Y) é o PM_{2.5} e as variáveis independentes (X) são os focos de queimadas. Na segunda etapa, a internação hospitalar passa a ser a variável dependente (Y) e o PM_{2.5} a variável independente (X). PM_{2.5} e internação hospitalar correlacionados nas escalas diária e mensal (CASTRO et al., 2009; LEE et al., 2011). O grau de dependência entre estas variáveis foi avaliado em função de parâmetros estatísticos, tais como: p-valor, R², r, α e o número de observações.

Tabela 3.1 – Anos de ocorrência dos eventos extremos de clima selecionados para esta pesquisa, bem como suas respectivas intensidades, anomalia de precipitação e focos de queimadas registrados nos mesmos períodos. Sendo vermelho: forte; azul: moderado; branco: normal; M: Marabá; S: Santarém.

Ano	Evento	Focos (M)	Focos (S)	Anomalia (M)	Anomalia (S)	Referências
2005	Dipolo positivo	3.331	574	-449.528	-286.461	Marengo et al. (2008)
2010	La Niña moderada	1.477	387	-175.228	-38.861	Lim et al. (2016)
2014	Normal	567	704	-121.528	-13.961	Silva Dias (2014)
2015	El Niño forte	877	659	-670.828	-524.461	Jiménez et al. (2016)

Fonte: Dados extraídos do INPE/NOAA (2021).

3.3 Resultados e Discussões

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram a variabilidade diária de focos de queimadas para os municípios de Marabá e Santarém, mediante os eventos climáticos selecionados para esta pesquisa. Nota-se que o município de Marabá, localizado na parte leste do Pará, está mais suscetível aos efeitos climáticos do Atlântico (Figura 3.2a), em função do dipolo do Atlântico, com um número maior de incêndios florestais, sendo registrado o pico no mês de setembro (3.331), com quase 400 focos de queimadas em um único dia e com o segundo maior déficit de precipitação (-449,528 mm) entre os anos estudados (Tabela 3.1). Contudo, o menor quantitativo foi registrado em 2014 (567), ano considerado normal. Esses resultados se mostram coerentes com os achados por Marengo et al. (2008), os quais afirmam que a seca de 2005 foi caracterizada por incêndios prolongados em várias regiões da Amazônia, incluindo a porção leste, o que sugere que a interação seca-fogo não é necessariamente restrita a eventos de El Niño e que o extremo leste da Amazônia sente mais os efeitos climáticos do Atlântico, em relação ao Pacífico. Portanto, anos de El Niño forte como em 2015, parecem não ter tanto efeito sobre as queimadas do município, do ponto de vista climático (Figura 3.2d).

Santarém, localizada no oeste do Pará, área central da Amazônia, mostrou um certo equilíbrio no número de queimadas florestais nos anos selecionados (Figura 3.3), porém o maior número registrado foi em 2014 (704), ano em que não houve episódios de eventos extremos, segundo a literatura (Tabela 3.1), o que sugere que o fator antrópico pode ter contribuído para esse aumento no número de queimadas. O maior

déficit de precipitação em Santarém ocorreu em 2015 (-524.461 mm), sob efeito do forte El Niño que se estabeleceu no Pacífico neste ano, fenômeno que desfavorece as chuvas na região, porém com o segundo maior número de queimadas (659), ficando atrás apenas de 2014 (Tabela 3.1). O menor número de focos de queimadas foi registrado em 2010 (387), com o segundo menor déficit de precipitação, situação dentro do esperado para um ano chuvoso, sob efeito do fenômeno La Niña que favorece as chuvas na região (MOREIRA et al., 2018).

Nota-se em geral, em relação aos focos de queimadas e da precipitação, que Santarém percebe mais os efeitos das variações climáticas do Pacífico, enquanto Marabá percebe melhor os efeitos do Atlântico. Também fica evidente que em todos os anos analisados, Santarém sempre registra o maior número de queimadas no mês de novembro, dois meses após o pico das queimadas em Marabá. A porção central da Amazônia demora mais a sentir os efeitos de mecanismos climáticos, entre eles a baixa umidade que propicia o processo de queimadas, mostrando assim poucas diferenças entre os anos selecionados.

Figura 3.2 – Registros diários de focos de queimadas florestais mediante eventos extremos de clima selecionados para o município de Marabá-PA: a) Dipolo do Atlântico; b) La Niña; c) Normal; d) El Niño.

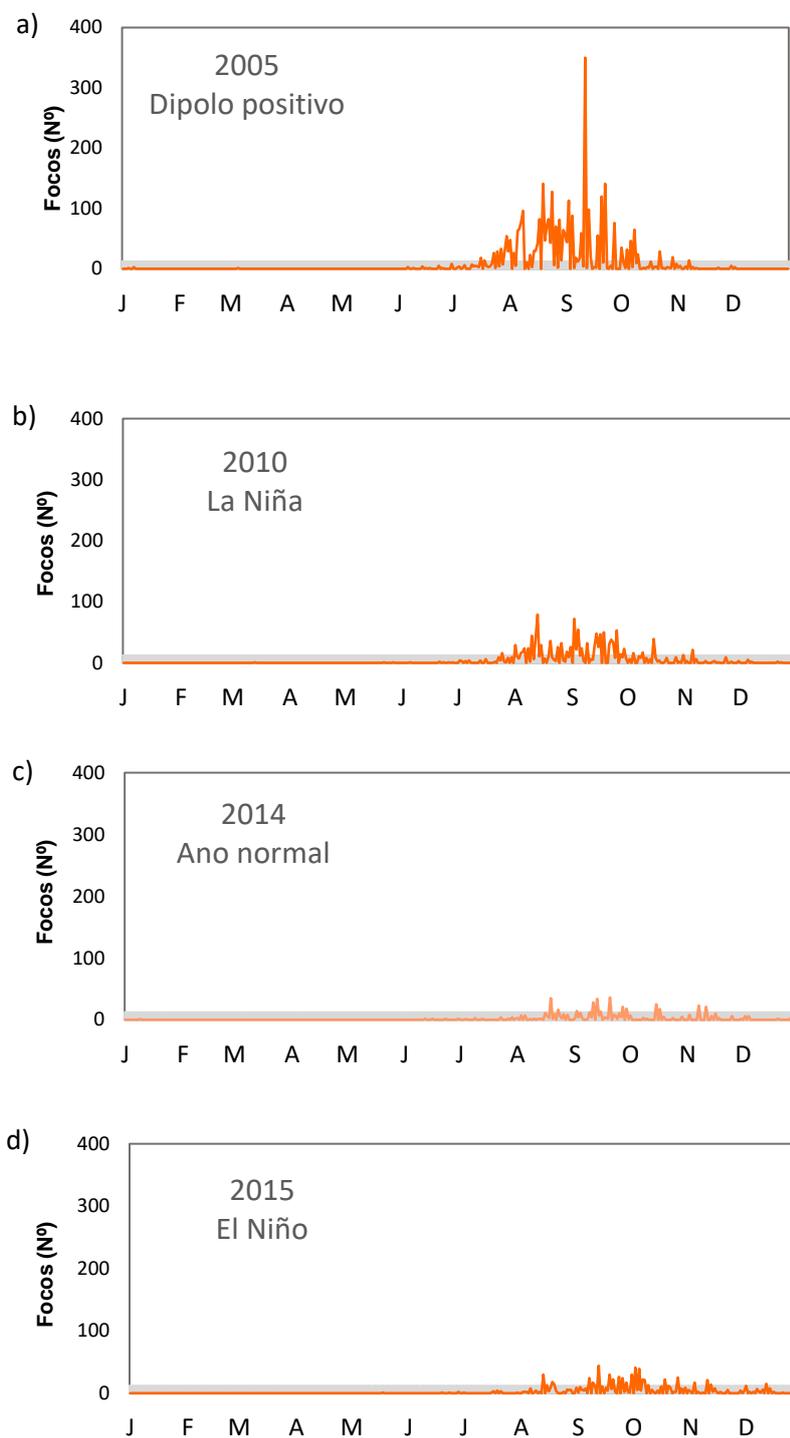
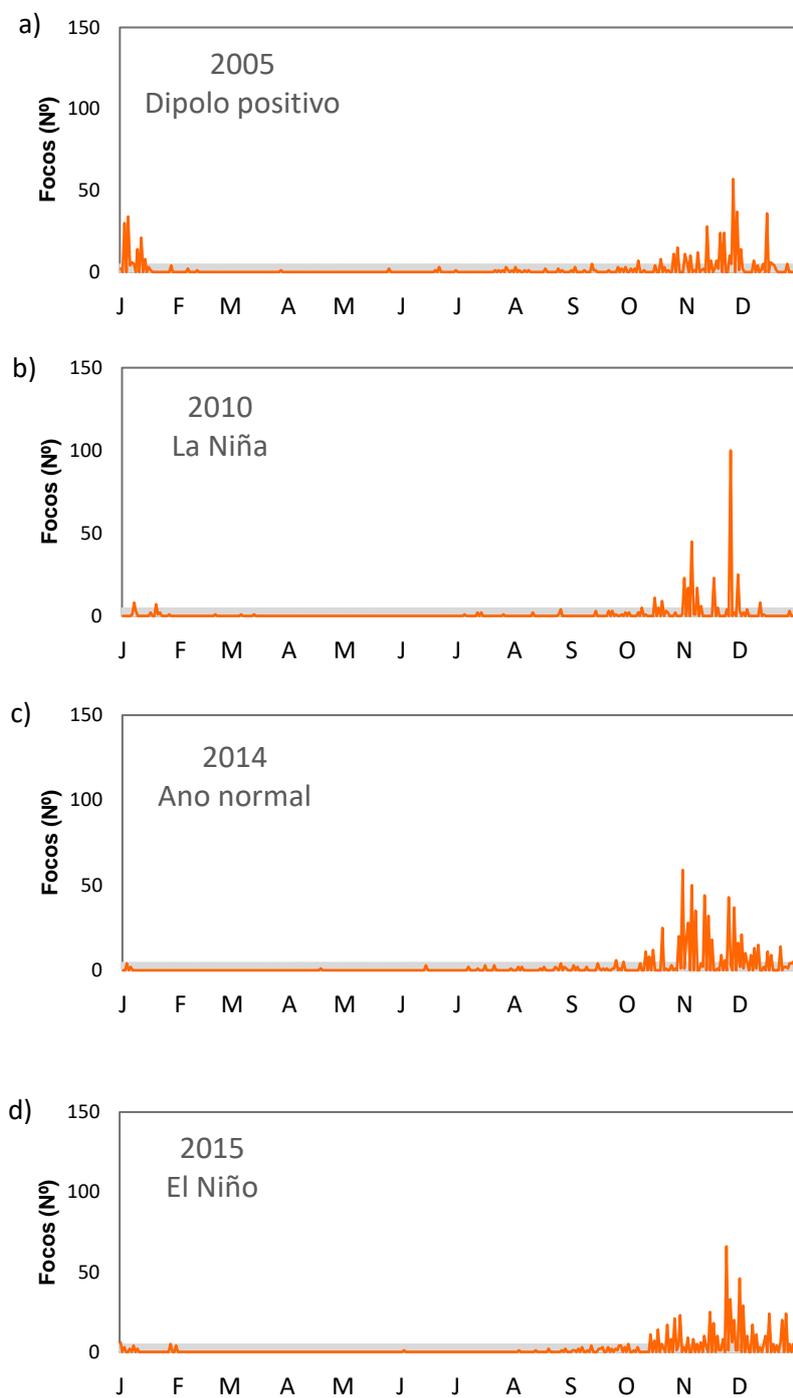


Figura 3.3 – Registros diários de focos de queimadas florestais mediante eventos extremos de clima selecionados para o município de Santarém-PA: a) Dipolo do Atlântico; b) La Niña; c) Normal; d) El Niño.



A Figura 3.4 mostra a espacialização do padrão de anomalia de temperatura da superfície do mar (TSM) para as bacias do Atlântico e Pacífico, evidenciando os episódios de dipolo positivo do Atlântico, La Niña, ano normal e El Niño para os anos de 2005, 2010, 2014 e 2015, respectivamente. No caso de 2010 (Figura 3.4b), as temperaturas se mantiveram abaixo da média, principalmente no trimestre SET-OUT-NOV, sob atuação do fenômeno La Niña, onde é possível observar que o resfriamento abrangeu toda a faixa equatorial, alcançando a porção oeste da bacia, situação favorável ao aumento das chuvas na Amazônia, período em que Santarém registrou o menor quantitativo de queimadas (Figura 3.3b) e o segundo menor déficit de chuvas (Tabela 3.1). No entanto, em 2015 (Figura 3.4d), o fenômeno ENOS se estabeleceu com uma fase positiva, conhecida na literatura como El Niño, com anomalias positivas de TSM, causando efeito contrário ao de 2010, sendo desfavorável ao aumento das chuvas na porção norte do Brasil. Estudos têm relatado que esse episódio de El Niño foi o mais forte e duradouro em 30 anos, se estendendo por todo o ano de 2016, provocando importantes implicações para o meio ambiente e para a saúde humana em regiões diferentes do planeta, incluindo a Amazônia Legal (ANYAMBA et al., 2019; JIMÉNEZ et al., 2016).

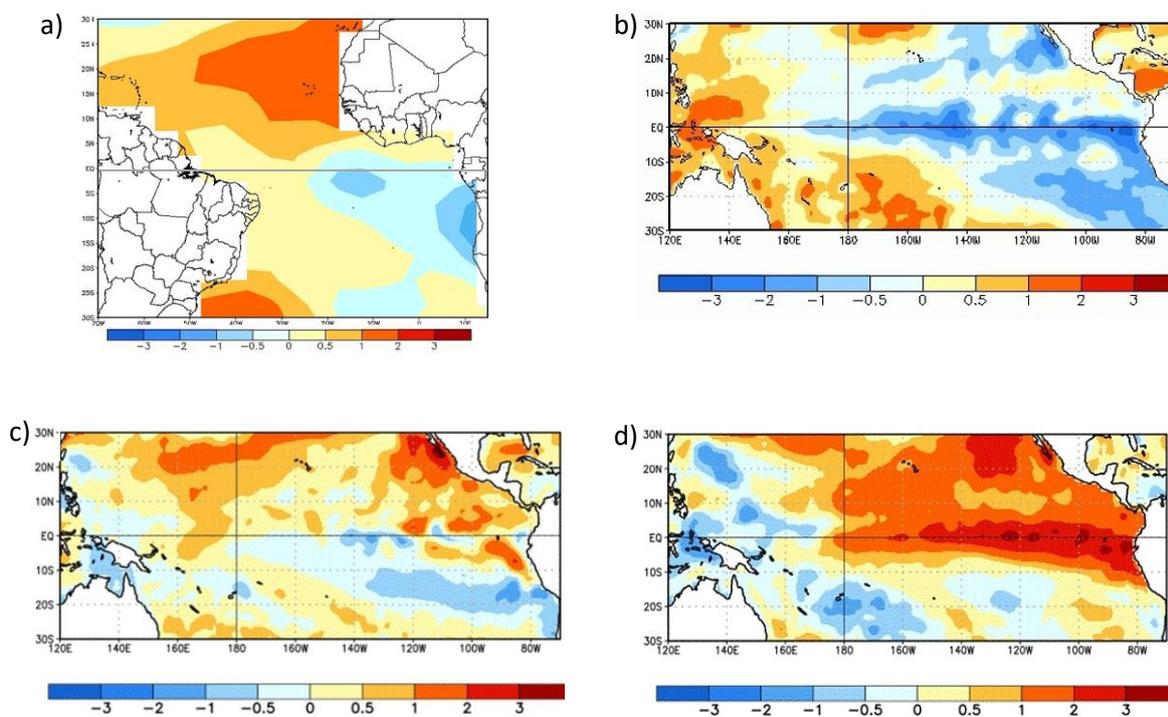
Este cenário climático que se estabeleceu no Pacífico em 2015, causou o maior déficit de chuvas no município de Santarém entre os quatro anos investigados e o segundo maior número de queimadas florestais. Logo, os eventos extremos ocorridos em 2010 e 2015, deixam claro que o município de Santarém percebe com mais intensidade os efeitos provocados por mudanças ambientais no Pacífico, em relação ao Atlântico.

A variabilidade das chuvas na Amazônia tem sido frequentemente associada ao fenômeno ENOS, no entanto, Yoon e Zeng (2010) mostram que apenas algumas regiões da bacia amazônica sofrem os efeitos diretos do ENOS, os autores fornecem evidências de uma influência nas chuvas da Amazônia no oceano Atlântico tropical. Estudos mostram que o extremo leste da Amazônia pode ser bastante afetado pelo gradiente meridional de temperatura no Atlântico equatorial, caracterizado por um dipolo de TSM, positivo ou negativo, em ambos os hemisférios, como mostra a Figura 3.4a. O dipolo positivo do Atlântico de 2005, mostrou uma configuração desfavorável à produção de chuvas na Amazônia oriental, com TSM acima da normal climatológica no hemisfério norte, provocando mudanças na atuação de fenômenos meteorológicos de grande escala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), um dos principais

causadores de chuva no norte do Brasil (TEODORO et al., 2019), o que deflagrou uma seca sem precedentes em vários setores da Amazônia, comprometendo a vazão de rios importantes, bem como a umidade do solo, deixando a vegetação mais seca e inflamável (ZENG et al., 2008).

Como foi visto, um vasto número de estudos mostra que fenômenos climáticos de acoplamento oceano-atmosfera, como ENOS e dipolo do Atlântico, têm grande potencial de impacto ambiental e social na Amazônia, porém a localização geográfica dos municípios torna-se um fator decisivo na modulação que estes mecanismos climáticos de grande escala têm sobre as mais diversas variáveis ambientais. No caso de Marabá, localizado na porção leste do Pará, o município sentiu os maiores efeitos da seca e das queimadas durante o episódio de dipolo do Atlântico em 2005 (Figura 3.2a), mostrando que o Atlântico exerce forte influência sobre a região em que se encontra o município.

Figura 3.4 – Padrões de anomalias de TSM das bacias do Atlântico e Pacífico, para a média do trimestre MAR-ABR-MAI (2005) e SET-OUT-NOV (2010, 2014, 2015) de cada evento analisado. A anomalia foi calculada em relação à climatologia de 36 anos (1981-2017). a) 2005: Dipolo do Atlântico; b) 2010: La Niña; c) 2014: Normal; d) 2015: El Niño.



A Figura 3.4c mostra que em 2014, o oceano Pacífico não apresentou nenhuma configuração anormal em relação aos padrões de TSM na região equatorial, sendo

considerado por alguns estudos como um ano normal (SILVA DIAS, 2014). No entanto, vale destacar que Santarém obteve o maior quantitativo de focos de queimadas em 2014, o que deflagra outros fatores como o antropogênico de âmbitos político e econômico.

Das Figuras 3.5-3.12 são apresentados os resultados das correlações obtidas para cada ano selecionado, mediante o cálculo de regressão linear feito para $PM_{2.5}$ e queimadas e, posteriormente, para o número de internações hospitalares e $PM_{2.5}$.

Santarém obteve as maiores correlações quando se relacionou $PM_{2.5}$ e focos de queimadas com destaque para 96% de correlação entre as duas variáveis em 2015 (Figura 3.12a), ano de El Niño forte que ocasionou o maior déficit de precipitação, com chuvas abaixo da média e com o segundo maior número de queimadas florestais no acumulado anual. Quando se analisou a relação entre $PM_{2.5}$ e internações, o destaque novamente foi para 2015 (Figura 3.12b) com 40,5% de correlação entre as duas variáveis. Um estudo feito por Santos Clemente et al. (2017) confirmou, com base em uma estatística descritiva, exploratória e paramétrica, um aumento significativo nos incêndios florestais, mostrando que o El Niño forte tem grande influência no agravamento do clima quente e seco, na mudança do padrão de chuva e na umidade, porém concluiu que essa situação não é verificada em todos os anos, quando se faz uma análise de uma longa série temporal.

Diferentemente de Santarém, Marabá mostrou maiores correlações em 2005 e 2010 com 84,8% (Figura 3.5a) e 96% (Figura 3.6a) de correlação, respectivamente, entre as variáveis $PM_{2.5}$ e focos de queimadas. O ano de 2005 mostrou aumento para estas duas variáveis, com o maior número de queimadas florestais e, conseqüentemente, de material particulado fino. Como foi mostrado na Figura 3.4a, 2005 foi um ano de expressivas mudanças no padrão de TSM do Atlântico, mostrando que o extremo leste da Amazônia sofre com as implicações provenientes da variabilidade climática do Atlântico equatorial (SOUSA; CANDIDO; ANDREOLI, 2018). Em relação às internações hospitalares por doenças respiratórias, a maior correlação se deu no ano de 2014, com 52,6% de correlação (Figura 3.7b).

A Tabela 3.2 faz um resumo dos resultados obtidos pelo cálculo da regressão linear entre as variáveis $PM_{2.5}$, focos de queimadas e internações hospitalares por doenças respiratórias, mostrando o número de observações para cada ano e o nível de significância preestabelecido.

Figura 3.5 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) $PM_{2.5}$ e focos de queimadas; b) $PM_{2.5}$ e internações hospitalares por doenças respiratórias para Marabá-PA em 2005, com 84,8% e 35% de correlação, respectivamente.

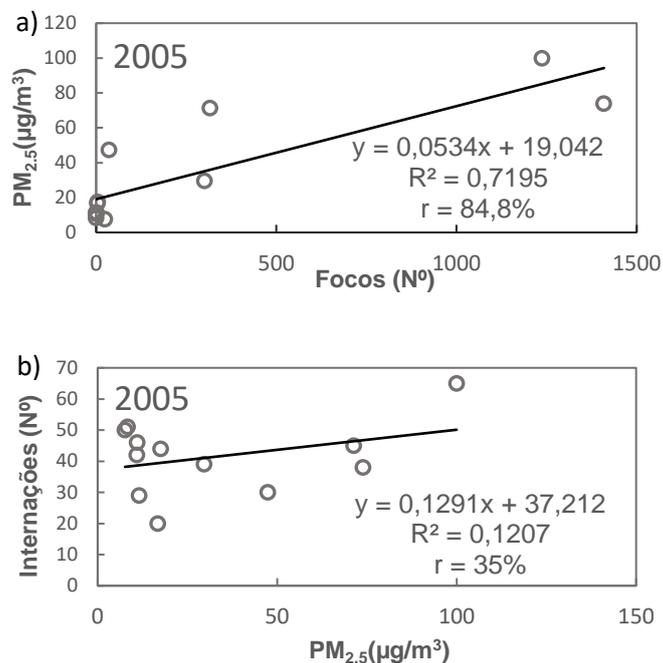


Figura 3.6 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) $PM_{2.5}$ e focos de queimadas; b) $PM_{2.5}$ e internações hospitalares por doenças respiratórias para Marabá-PA em 2010, com 96% e 53,9% de correlação, respectivamente.

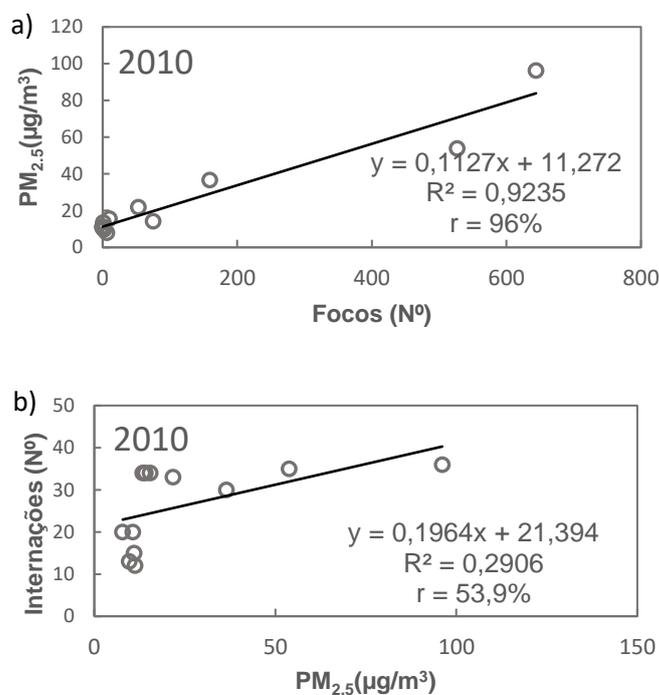


Figura 3.7 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) $PM_{2.5}$ e focos de queimadas; b) $PM_{2.5}$ e internações hospitalares por doenças respiratórias para Marabá-PA em 2014, com 51,7% e 52,6% de correlação, respectivamente.

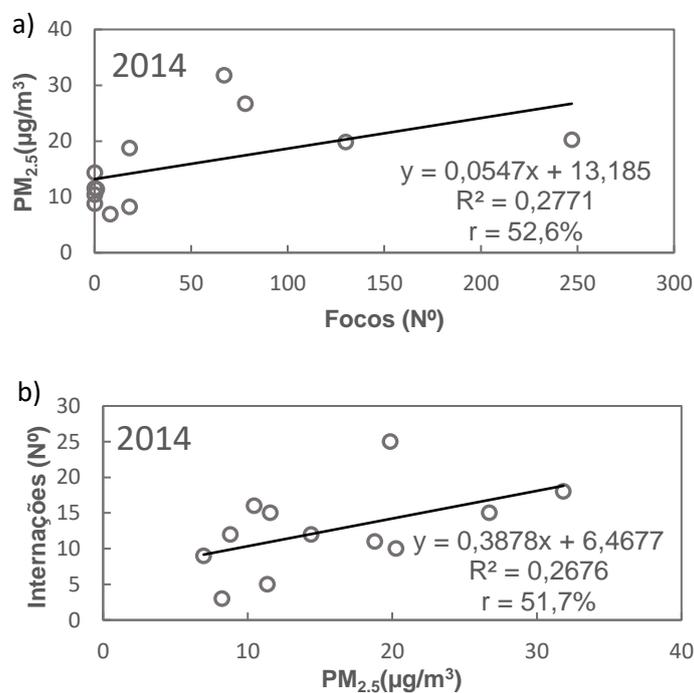


Figura 3.8 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) $PM_{2.5}$ e focos de queimadas; b) $PM_{2.5}$ e internações hospitalares por doenças respiratórias para Marabá-PA em 2015, com 25,4% e 36,4% de correlação, respectivamente.

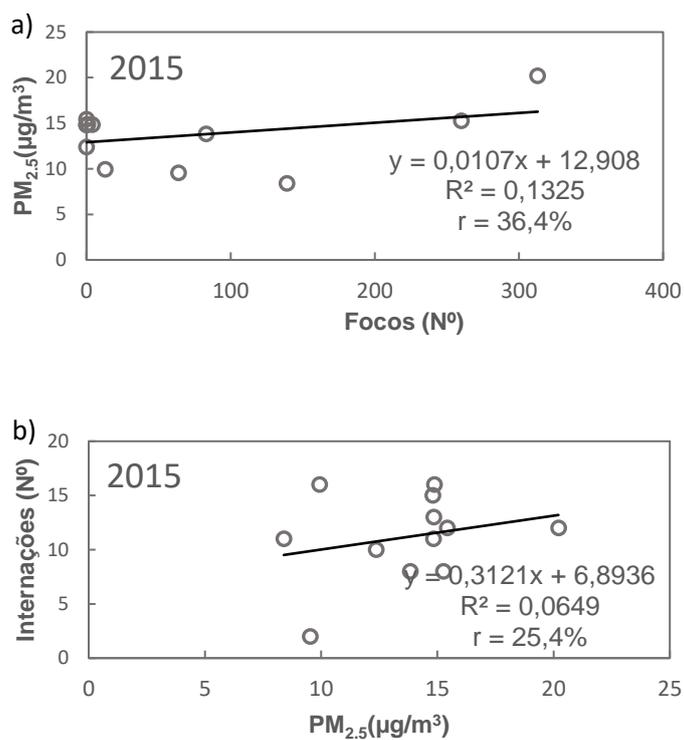


Figura 3.9 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) $PM_{2,5}$ e focos de queimadas; b) $PM_{2,5}$ e internações hospitalares por doenças respiratórias para Santarém-PA em 2005, com 86% e 44,4% de correlação, respectivamente.

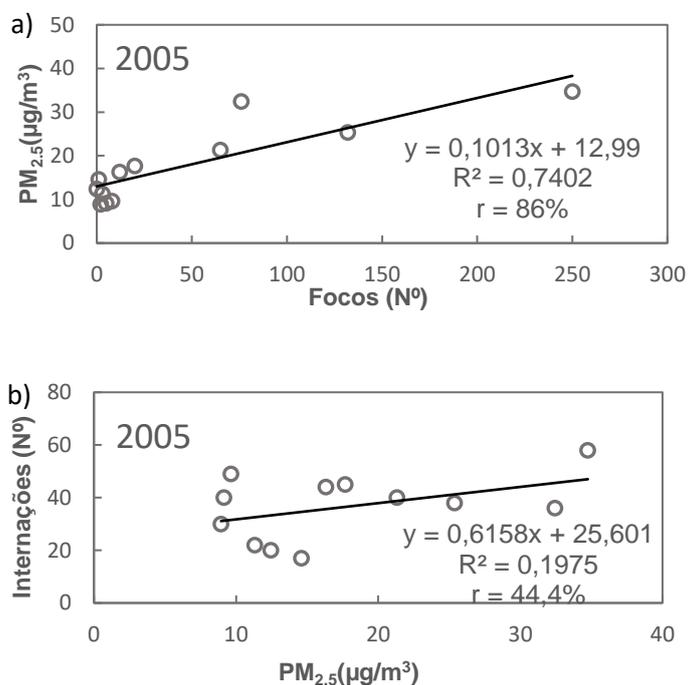


Figura 3.10 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) $PM_{2,5}$ e focos de queimadas; b) $PM_{2,5}$ e internações hospitalares por doenças respiratórias para Santarém-PA em 2010, com 78,6% e 36,3% de correlação, respectivamente.

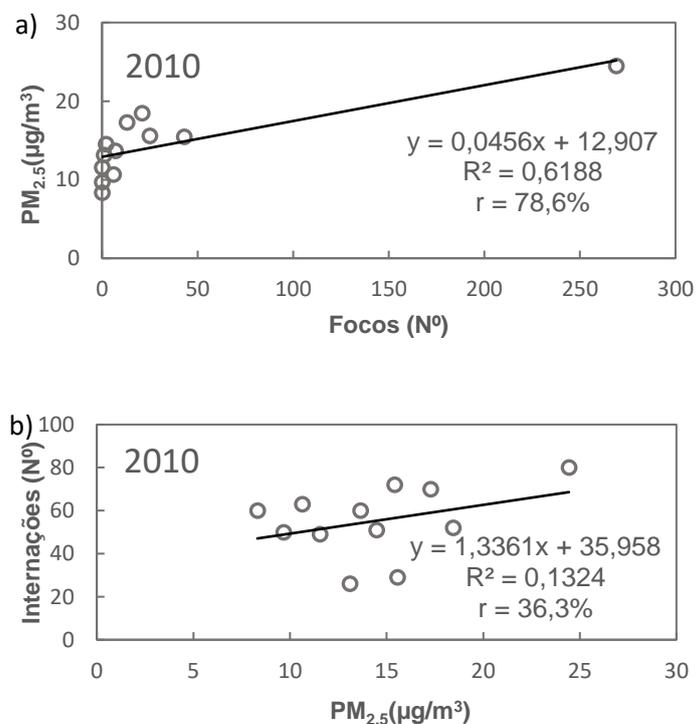


Figura 3.11 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) $PM_{2.5}$ e focos de queimadas; b) $PM_{2.5}$ e internações hospitalares por doenças respiratórias para Santarém-PA em 2014, com 84,1% e 34,1% de correlação, respectivamente.

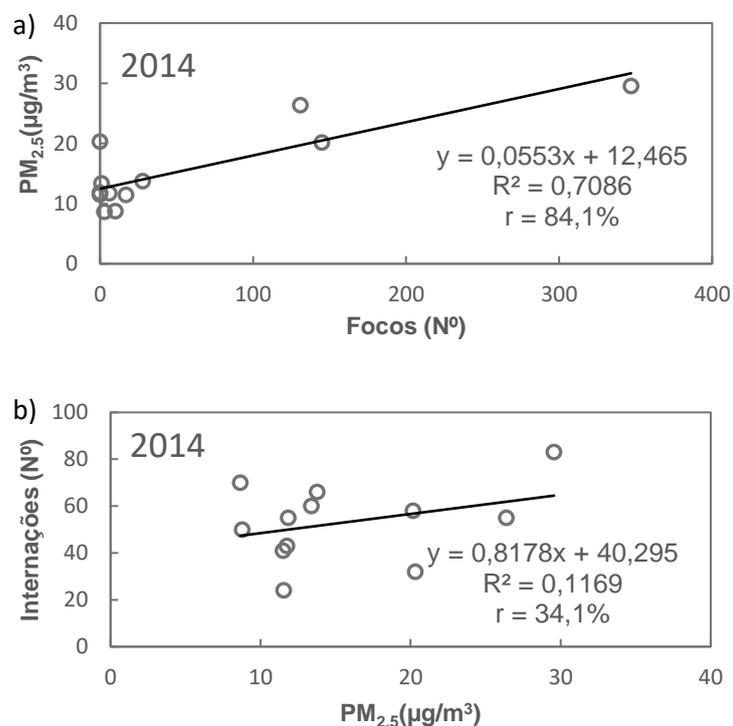


Figura 3.12 – Exposição dos cálculos de regressão linear: a) $PM_{2.5}$ e focos de queimadas; b) $PM_{2.5}$ e internações hospitalares por doenças respiratórias para Santarém-PA em 2015, com 96,2% e 40,5% de correlação, respectivamente.

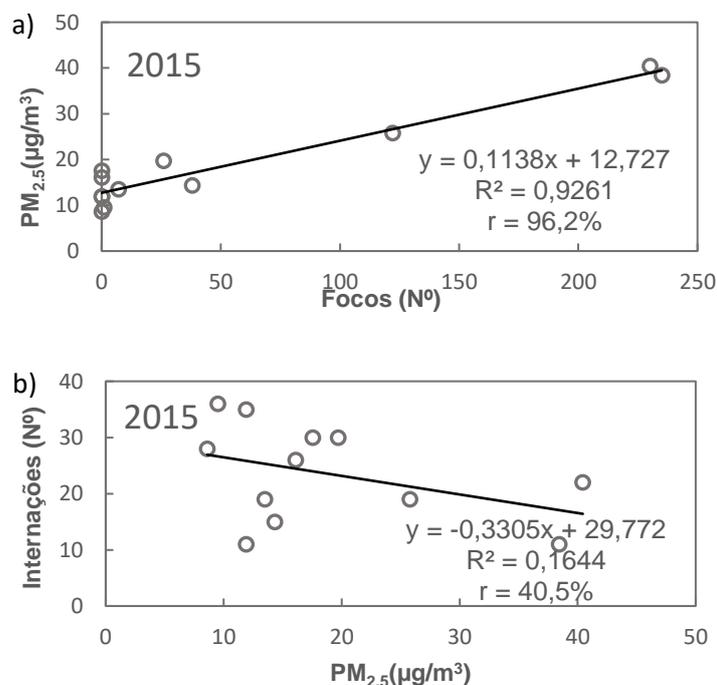


Tabela 3.2 – Resumo das análises mensais de regressão linear para os eventos selecionados nos municípios de Marabá e Santarém. R²: coeficiente de determinação; r: coeficiente de correlação; α : significância estatística; F: focos de queimadas; I: internações hospitalares.

MARABÁ								
	2005		2010		2014		2015	
	PM _{2.5} x F	PM _{2.5} x I	PM _{2.5} x F	PM _{2.5} x I	PM _{2.5} x F	PM _{2.5} x I	PM _{2.5} x F	PM _{2.5} x I
R²	0,7195	0,1207	0,9235	0,2906	0,2676	0,2771	0,0649	0,1325
r	84,8%	35%	96%	53,9%	51,7%	52,6%	36,4%	25,4%
α	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
p-valor	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Observações	12	12	12	12	12	12	12	12
SANTARÉM								
	2005		2010		2014		2015	
	PM _{2.5} x F	PM _{2.5} x I	PM _{2.5} x F	PM _{2.5} x I	PM _{2.5} x F	PM _{2.5} x I	PM _{2.5} x F	PM _{2.5} x I
R²	0,7402	0,1975	0,6188	0,1324	0,7086	0,1169	0,9261	0,1644
r	86%	44,4%	78,6%	36,3%	84,1%	34,1%	96%	40,5%
α	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
p-valor	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Observações	12	12	12	12	12	12	12	12

Com base nos resultados apresentados pela Tabela 3.2 e pelas figuras anteriores, fica evidente que eventos extremos de clima têm considerável contribuição para o aumento das queimadas e, conseqüentemente, para o aumento da poluição do ar, porque deixa o ambiente favorável ou desfavorável à ação do fogo, elevando assim a procura por atendimento médico por complicações respiratórias, porém existem outros agravantes que fazem com que essa relação não seja linear. Esta hipótese ganha substância quando se analisa o ano de 2014 separadamente. Embora 2014 tenha sido um ano considerado normal, foi o ano com maior número de queimadas em Santarém e com 34.1% de correlação entre PM_{2.5} e internações hospitalares.

Outro fato importante a ser mencionado é que o ano de 2015 foi um período de um evento extremo significativo, com chuvas muito abaixo do normal para Marabá, com o menor déficit hídrico entre os anos escolhidos, porém 2005 e 2010 foram os anos que registraram um número muito maior de focos de queimadas para o município em questão.

Fatores como políticas públicas, fragilidade na fiscalização por órgãos ambientais e o atrativo industrial através de incentivos fiscais estão entre as causas mais pertinentes ao aumento das queimadas e da poluição atmosférica, mesmo em anos considerados desfavoráveis à acelerada queima da biomassa, do ponto de vista

climático. Estudos voltados a esta temática (MELO; ARTAXO, 2017) afirmam que o desmatamento seguido de queimadas na Amazônia Legal apresenta um grau de complexidade extremo em diferentes dimensões e que é necessário um engajamento entre as esferas municipal, estadual e federal, além do setor empresarial e da sociedade civil para a implantação e manutenção de ações competentes ao Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm).

A partir de 2004, foi observado uma redução acentuada do desmatamento na região amazônica devido a ação de políticas públicas. Segundo Nepstad et al. (2014), essa redução se deve à aplicação e criação de leis, intervenções nas cadeias de abastecimento de soja e carne, restrições de acesso ao crédito, expansão das áreas protegidas e aplicação de medidas punitivas, fatores que atualmente precisam ser resgatados ou aprimorados para evitar uma expansão ainda maior do desmatamento e das queimadas florestais em um futuro próximo.

Um outro estudo feito por Rodrigues et al. (2019), mostra que fatores socioeconômicos podem aumentar os efeitos da poluição do ar na saúde humana, como por exemplo, o grau de exposição aos poluentes de grupos sociais com condições socioeconômicas ruins que pode explicar maiores implicações no surgimento de doenças cardiovasculares (DC) por estarem mais expostos à poluição.

Outro fator importante que precisa ser ressaltado é a poluição por PM_{2.5} de outras fontes poluidoras como a mineração, presente no município de Marabá há décadas, contribuindo para o agravamento da qualidade do ar, como mostra Milanez (2017) em que situações específicas a extração do minério pode aumentar a poluição local por PM_{2.5} em ambientes altamente industrializados.

3.4 Conclusões

Com base na investigação proposta por este capítulo, mediante eventos extremos de clima selecionados e suas possíveis consequências ao aumento das queimadas florestais e à saúde humana, os resultados encontrados apontam as seguintes conclusões:

- O fator climático é fundamental no entendimento do processo de poluição por aerossóis de queimadas porque deixa o cenário favorável ou desfavorável à prática do fogo, entretanto, apesar da comprovada contribuição da variabilidade

do clima no aumento das queimadas florestais, fica evidente que o aumento da poluição do ar pode ser potencializado por outros fatores como localização geográfica, políticas públicas e a vulnerabilidade social, principalmente em uma região complexa no âmbito climático, social e de grande extensão territorial como o estado do Pará;

- Na maioria dos anos selecionados, a relação entre $PM_{2.5}$ e queimadas mostrou boa correlação para os dois municípios, mostrando que o aumento das queimadas eleva os níveis de poluição atmosférica, com diferenças apenas na magnitude do valor do poluente para cada ano analisado;
- A correlação estatística mostrou que anos sem extremos climáticos podem registrar um grande número de queimadas, assim como eventualmente, anos anômalos podem não registrar um número significativo de queimadas, com efeitos sobre o número de adoecimentos respiratórios, confirmando que a relação entre clima e saúde não é linear na maioria dos casos investigados;
- Ficou constatado que Marabá, localizada no extremo leste da área de estudo, responde melhor aos efeitos de anomalias ambientais do Atlântico, enquanto que Santarém responde mais às mudanças do Pacífico, com nítida defasagem no tempo em relação a esses efeitos, diferença observada de dois meses, Marabá (setembro) e Santarém (novembro);
- É importante esclarecer que a metodologia aplicada neste estudo não separa com precisão o quanto a variabilidade climática natural é responsável pelo aumento das queimadas florestais e, conseqüentemente, da poluição atmosférica e dos atendimentos hospitalares por doenças respiratórias, pois não analisa os efeitos de forma individual. Porém, deixa claro que dependendo do local estudado, as oscilações climáticas podem deixar o ambiente favorável à prática ilegal das queimadas, elevando assim os níveis de poluição do ar em centros urbanos.

REFERÊNCIAS

ALVES, N.; VESSONI, A.; QUINET, A.; FORTUNATO, R.; KAJITANI, G.; PEIXOTO, M.; MEDEIROS, S. Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2017.

ANDREÃO, WL, De ALMEIDA ALBUQUERQUE, TT. Fine particles as a public health indicator in Brazil: from monitoring to modeling. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v.13, n.12, p. 1453-1463, 2020.

ANYAMBA, A.; CHRETIEN, J.P.; BRITCH, S.C.; SOEBIYANTO, R.P.; SMALL, J.L.; JEPSEN, R.; LINTHICUM, K.J. Global disease outbreaks associated with the 2015–2016 El Niño event. **Scientific Reports**, v.9, n.1, p. 1-14, 2019.

BANDEIRA CASTELO, T.; ADAMI, M.; NASCIMENTO DOS SANTOS, R. Fronteira Agrícola e a política de priorização dos municípios no combate ao desmatamento no estado do Pará, Amazônia. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 28, n. 2, p. 434-457, 2020.

BARBOSA, R.I.; FEARNSIDE, P.M. Incêndios na Amazônia brasileira: estimativa da emissão de gases do efeito estufa pela queima de diferentes ecossistemas de Roraima na passagem do evento “El Niño” (1997/98). **Acta Amazônica**, v. 29, n. 4, p. 513-534, 1999.

BARCELLOS, C.; MONTEIRO, A.M.V.; CORVALÁN, C.; GURGEL, H.C.; CARVALHO, M.S.; ARTAXO, P.; RAGONI, V. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 18, n. 3, p. 285-304, 2009.

BOSILOVICH, M.G.; LUCCHESI, R.; SUAREZ, M. **MERRA-2**: File Specification. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1), 2016. 73 p. Disponível em: http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/office_notes. Acesso em: 14 de fevereiro de 2021.

CASTRO, H.A.D.; GONÇALVES, K.D.S.; HACON, S.D.S. Tendência da mortalidade por doenças respiratórias em idosos e as queimadas no Estado de Rondônia/Brasil: período entre 1998 e 2005. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 14, p. 2083-2090, 2009.

GONÇALVES, K.S.; WINKLER, M.S.; BENCHIMOL-BARBOSA, P.R.; HOOGH, K.; ARTAXO, P.E.; HACON, S.S.; KÜNZLI, N. Development of non-linear models predicting daily fine particle concentrations using aerosol optical depth retrievals and ground-based measurements at a municipality in the Brazilian Amazon region. **Atmospheric Environment**, v. 184, p. 156-165, 2018.

JIMÉNEZ-Muñoz, J.C.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K.; MALHI, Y.; VAN DER SCHRIER, G. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2016.

LEE, H.J.; LIU, Y.; COULL, B.A.; SCHWARTZ, J.; KOUTRAKIS, P. A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict PM 2.5 concentrations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, n. 15, p. 7991-8002, 2011.

LIM, E.P.; HENDON, H.H.; ARBLASTER, J.M.; CHUNG, C.; MOISE, A.F.; HOPE, P.; ZHAO, M. Interaction of the recent 50 year SST trend and La Niña 2010: amplification of the Southern Annular Mode and Australian springtime rainfall. **Climate Dynamics**, v. 47, n. 7, p. 2273-2291, 2016.

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.D.; SAMPAIO, OLIVEIRA, G.; De OLIVEIRA, R.; BROWN, I.F. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of climate**, v. 21, n. 3, p. 495-516, 2008.

McMICHAEL, A.J. Global climate change and health: an old story writ large. In: McMICHAEL, A.J.; CAMPBELL- LENDRUM, D.H.; CORVALAN, C.F.; EBI, K.L.; GITHENKO, A.; SCHERAGA, J.D. Climate change and human health. Risks and responses. Geneva: WHO, 2003, p. 1-17.

MELLO, N.G.R.; ARTAXO, P. Evolução do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal. **Revista do Instituto de Estudos Brasileiros**, n. 66, p. 108-129, 2017.

MILANEZ, B. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. **Boletim Regional Urbano e Ambiental**, n. 16, p. 1-10, 2017.

MOREIRA, S.F.; CONCEIÇÃO, C.S.; CRUZ, M.C.S.; PEREIRA JUNIOR, A. A Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a dinâmica climática da região Amazônica. **Multidisciplinary Reviews**, v. 1, 2018.

NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; STICKLER, C.; ALENCAR, A.; AZEVEDO, A.; SWETTE, B.; HESS, L. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1118-1123, 2014.

NOBRE, C.A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

PARKS, R. Meeting report. **Weather, Climate and Health**, v.71, n.8, 2016.

PEREIRA, H.R.; REBOITA, M.S.; AMBRIZZI, T. Características da atmosfera na primavera austral durante o El Niño de 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 293-310, 2017.

RODRIGUES, P.C.D.O.; IGNOTTI, E.; HACON, S.D.S. Fatores socioeconômicos aumentam os efeitos nocivos da poluição atmosférica e da temperatura na mortalidade. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 22, p. e190011, 2019.

SANTOS CLEMENTE, S.; OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; PASSOS LOUZADA, M. A. Focos de calor na Mata Atlântica do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 669-677, 2017.

SILVA, DIAS, M.A.F. Eventos climáticos extremos. **Revista USP**, n. 103, p. 33-40, 2014.

SMITH, L.T.; ARAGAO, L.E.; SABEL, C.E.; NAKAYA, T. Drought impacts on children's respiratory health in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2014.

SOUSA, A.C.; CANDIDO, L.A.; ANDREOLI, R.V. Variabilidade interanual da precipitação e fluxo de umidade sobre a Amazônia usando o QTCM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 41-56, 2018.

TEODORO, T.A.; REBOITA, M.S.; ESCOBAR, G.C.J. Caracterização da Banda Dupla da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no Oceano Atlântico. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 2, p. 282-298, 2019.

THONICKE, K.; VENEVSKY, S.; SITCH, S.; CRAMER, W. The Role of Fire Disturbance for Global Vegetation Dynamics: Coupling Fire into a Dynamic Global Vegetation Model. **Global Ecology & Biogeography**, v. 10, p. 661- 677, 2001.

TOMZHINSKI, G.W.T.; COURA, P.H.F.; COUTO F.M. Avaliação da detecção de focos de calor por sensoriamento remoto para o Parque Nacional do Itatiaia. **Biodiversidade Brasileira-BioBrasil**, n. 2, p. 201-2011, 2011.

YOON, J.H.; ZENG, N. An Atlantic influence on Amazon rainfall. **Climate dynamics**, v. 34, n. 2, p. 249-264, 2010.

ZENG, N.; YOON, J.H.; MARENGO, J.A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C.A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J.D. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought, **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 1, p. 014002, 2008.

CAPÍTULO 4 POLUIÇÃO POR AEROSSÓIS DE QUEIMADAS FLORESTAIS E SUAS IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE PÚBLICA NO ESTADO DO PARÁ: UM ESTUDO DE CASO

RESUMO

A aumento das queimadas na Amazônia nos últimos anos, associado às condições de seca tem afetado a qualidade de vida das pessoas através do acometimento de doenças respiratórias, principalmente em áreas de intensa mudança no uso da terra. Esta pesquisa se propôs a fazer um estudo de caso de um episódio de incêndios florestais e suas consequências ambientais e sociais, durante todo o ano de 2017, nos municípios de Marabá e Santarém, ambos no estado do Pará. Foi feito um delineamento ecológico de série temporal de carácter epidemiológico para um grupo populacional com idade entre 1 e 9 anos, residentes nos municípios investigados. Os indicadores de qualidade do ar foram expressos conforme os níveis de exposição estabelecidos pelo CONAMA. O banco de dados foi construído com medidas diárias e mensais de focos de queimadas, $PM_{2.5}$ e de internações hospitalares por doenças respiratórias. A análise espacial mostrou que as queimadas florestais se concentraram em maior quantidade em torno do município de Santarém, contribuindo para a alta poluição, principalmente no mês de novembro, quando o município atingiu os maiores valores de registros hospitalares. A mesma situação foi observada em Marabá, porém com pico em setembro. A análise estatística com auxílio do modelo de regressão linear mostrou correlação estatisticamente significativa entre o $PM_{2.5}$ e focos de queimadas em Marabá (77%) e Santarém (59%). Essa estreita relação também se manteve quando se associou internações hospitalares com $PM_{2.5}$, Marabá (61,7%) e Santarém (63%). Os dois municípios estudados se mostraram poluídos e com baixa qualidade do ar, em relação ao $PM_{2.5}$, ultrapassando o limiar de $60 \mu g/m^3$ estabelecido pela legislação ambiental. Apesar do número surpreendente de queimadas em Santarém (788), Marabá alcançou em setembro níveis de alerta ($210 \mu g/m^3$) e de emergência ($250 \mu g/m^3$) para poluição do ar, sendo classificado como município altamente poluído.

Palavras-chave: saúde ambiental; Pará; queimadas; qualidade do ar.

*Artigo submetido à revista Ambiente & Água, qualis A3 para ciências ambientais, segundo a classificação de periódicos da CAPES.

ABSTRACT

The increase in burnings in the Amazon in recent years, associated with drought conditions has affected the quality of life of people through the involvement of respiratory diseases, especially in areas of intense changes in land use. This research proposed to make a case study of an episode of forest fires and its environmental and social consequences, throughout the year 2017, in the municipalities of Maraba and Santarem, both in the state of Para. An ecological design was carried out as a series of epidemiological nature for a population group aged between 1 and 9 years, living in the municipalities investigated. The air quality indicators were expressed according to the exposure levels established by CONAMA. The database was built with daily and monthly measurements of fire outbreaks, $PM_{2.5}$ and hospital admissions for respiratory diseases. The spatial analysis shows that forest fires were concentrated in greater quantities around the municipality of Santarem, contributing to the high pollution, mainly in the month of November, when the municipality reached the highest values of hospital records. The same situation was observed in Maraba, but peaked in September. Statistical analysis with the aid of the linear regression model showed a statistically significant correlation between $PM_{2.5}$ and fires in Maraba (77%) and Santarem (59%). The close relationship was also maintained when hospital admissions were associated with $PM_{2.5}$, Maraba (61.7%) and Santarem (63%). The two municipalities studied were polluted and had low air quality in relation to $PM_{2.5}$, exceeding the $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ threshold established by environmental legislation. Despite the surprising number of fires in Santarem (788), Maraba reached in September alert ($210 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and emergency ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) levels for air pollution, being classified as a highly polluted municipality. It is notorious and worrying the advance of fires in regions close to Santarem, due to illegal deforestation in areas of environmental conservation, which sets off a warning for a broader public environmental management in the inspection and promotion of research on air quality.

Keyword: environmental health, Para, fires, air quality.

4.1 Introdução

Nos últimos anos, o Brasil tem sido foco de assuntos internacionais no que se refere à proteção das florestas tropicais contra o desmatamento e, conseqüentemente, as queimadas florestais. O monitoramento, bem como a elaboração de estudos voltados à incidência crescente de focos de incêndios florestais são de extrema importância para a criação de políticas públicas e para a tomada de decisões voltadas à mitigação deste problema tão nefasto ao meio ambiente e à saúde pública (GONTIJO et al., 2011).

Além da cultura enraizada dos povos tradicionais em relação ao manejo do fogo, a maioria dos incêndios florestais é criminosa, sendo consequência do desmatamento ilegal, com grandes clareiras abertas por madeireiros, corte de árvores de grande valor econômico, o que reduz a disponibilidade de água no solo, mudando assim o clima local, deixando o solo mais frágil, pobre em nutrientes e a biomassa seca e inflamável (IMAZON, 2017).

Estudos apontam diversas consequências geradas pelas queimadas florestais, uma delas está na liberação de gases de efeito estufa (GEE), pois quando a floresta queima, é liberado para a atmosfera carbono na forma de gás (CO_2) por centenas de anos, por outro lado deixando de armazenar cerca de 100 bilhões de toneladas de carbono, se estivesse com suas características naturais preservadas (RÖDIG et al., 2019).

Outra consequência bastante relatada pela literatura é a influência das queimadas florestais na saúde humana, por causa da liberação de partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) de aerossol atmosférico. Segundo um boletim técnico feito pelo Observatório de Clima e Saúde da Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), no intervalo de um ano, a exposição às partículas de aerossóis afetou diretamente a saúde humana, como o aumento da incidência de doenças respiratórias como a asma e as cardiovasculares no sul da Amazônia legal, que afetam principalmente crianças e idosos, além daqueles com histórico familiar e gestantes (FIOCRUZ, 2019; OLIVEIRA et al., 2017).

Estudos recentes mostram o quanto são nocivos à saúde e ao meio ambiente, níveis de material inalável fino acima das diretrizes estabelecidas pela Organização Mundial de Saúde (OMS). Um estudo interdisciplinar desenvolvido por Melo et al. (2018) em parceria com a FIOCRUZ, mostra que crianças estão inseridas no grupo etário mais suscetível à poluição atmosférica, por possuírem o sistema imunológico ainda em desenvolvimento e o aparelho respiratório em formação (OLIVEIRA, 2017).

Desta forma, torna-se importante o desenvolvimento de pesquisas que façam o mapeamento de locais e a contabilização de episódios em que houve um grande número de queimadas e suas consequências ambientais.

Um episódio recente na Amazônia oriental aconteceu no ano de 2017, o qual foi o período de recorde de focos de queimadas desde 1999 (18 anos) na Amazônia, com os maiores números já registrados pelo satélite de referência, levando os anos posteriores a uma crescente tendência de aumento de queimadas (INPE, 2018). Dados obtidos pelo INPE através de sensoriamento remoto, mostram que o Pará concentrou o maior número de focos de queimadas de todo o Brasil em 2017, com destaque para os municípios do sul e sudeste do estado por onde passa o arco do desmatamento.

De acordo com estudos ambientais que têm como base dados do Ministério da Saúde, o número de internações hospitalares, em grupos populacionais mais suscetíveis, aumenta durante episódios de grande seca combinada às queimadas produzidas de forma ilegal (DATASUS, 2017; FIOCRUZ, 2019).

Um relatório feito pelo Instituto de Pesquisas Ambientais da Amazônia (IPAM, 2020) mostra que em regiões do Pará de intenso processo de queimadas, o uso de medicamentos para o tratamento de doenças respiratórias aumentou significativamente, com retorno de pacientes aos hospitais em quase 100% das ocorrências. Isso é muito grave no contexto econômico, devido ao aumento dos gastos públicos, em função da destruição da floresta e da biodiversidade da Amazônia. Um outro estudo realizado no sudeste brasileiro, mostrou que ao reduzir as emissões de $PM_{2.5}$ a cada $5 \mu g/m^3$, reduziria em 76 atendimentos por doenças respiratórias graves, com uma economia de 84 mil reais ao ano (NASCIMENTO et al., 2016). Além disso, o Pará tem extensão territorial com padrões de uso e ocupação do solo bem distintos, nas porções norte e sul. Isso implica em padrões de emissão de particulado inalável com características físico-químicas bem diferentes (BUTT et al., 2020), a exemplo de Marabá, no leste da Amazônia oriental, que além de estar inserida na região do arco do desmatamento possui ainda atividades de exploração de ferro com emissão de particulados ainda pouco caracterizada, com impactos potencialmente danosos e diferenciados à saúde, ainda não explorados detalhadamente ao longo desses últimos anos, no sul do estado. Outras regiões, mais ao norte, historicamente menos impactadas por queimadas, têm apresentado números cada vez maiores de queimadas locais, devido à expansão urbana e fragilidades nas medidas protetivas de preservação das florestas. Estes aspectos fazem

destas regiões laboratórios perfeitos para novos estudos dos efeitos dos aerossóis na saúde pública dessa importante região da Amazônia.

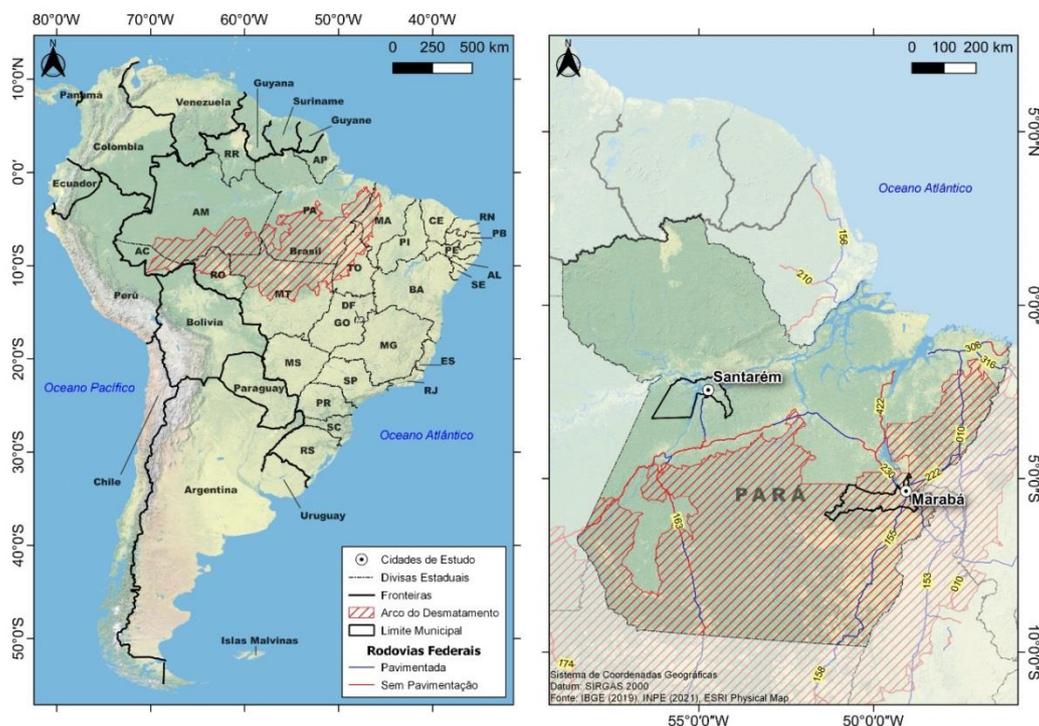
Com base nas informações acima e levando em consideração as importantes implicações trazidas pelas queimadas florestais em 2017, o objetivo desta pesquisa é realizar um estudo de caso de queimadas florestais e identificar danos causados à saúde humana nos municípios de Marabá e Santarém, através da emissão do material particulado fino (PM_{2,5}), durante o período investigado.

4.2 Material e Métodos

As análises deste estudo se limitaram aos municípios de Marabá e Santarém, distantes a 1.057,2 Km, ambos no estado do Pará, como mostra a Figura 4.1, onde o arco do desmatamento também é evidenciado, região marcada por drásticas mudanças no uso da terra, frequentes conflitos agrários e altos índices de desmatamento. Observa-se na Figura 1 que o arco do desmatamento (área hachurada em vermelho), engloba totalmente o município de Marabá no sudeste do estado, entretanto não alcança o município de Santarém, na região oeste.

Foram incluídos ao banco de dados, medidas diárias de focos de queimadas obtidas através do programa queimadas do INPE, mas que aqui foram transformados em mensais e anuais. Os focos de queimadas são detectados pelos satélites de referência TERRA e AQUA (sensor MODIS, com passagem no fim da manhã e início da tarde), pertencentes à NASA e de órbita polar, com resolução de 1Km. Esse monitoramento diário feito por sensoriamento remoto é de grande utilidade para detecção do fogo em áreas de difícil acesso (BITTENCOURT et al., 2020).

Figura 4.1 - Mapa da área de estudo com ênfase no estado do Pará, na Amazônia oriental. A imagem inclui as malhas hidroviária e rodoviária, com os municípios de Marabá e Santarém, dentro e fora do arco do desmatamento (hachurado), respectivamente.



Fonte: Elaborada pelo autor. Dados disponibilizados pelo IBGE/INPE (2021).

O município de Marabá possui uma população de 283.542 habitantes (IBGE, 2021), sendo que desse total, 17% são de crianças com idade igual ou menor a 9 anos de idade. O município ainda conta com um hospital regional de alta e média complexidade e mais 40 estabelecimentos de saúde do SUS, incluindo unidades básicas de saúde (UBS) e unidades de pronto atendimento (UPA'S).

Santarém tem atualmente 306.480 habitantes (IBGE, 2021), sendo que 20% da população está inserida na faixa etária até 9 anos de idade. O município conta com um hospital regional de alta e média complexidade e mais 99 estabelecimentos de saúde do SUS, incluindo hospitais de baixa complexidade e unidades de pronto atendimento (UPA'S).

O ano de 2017 foi escolhido como período de análise desta pesquisa por ter apresentado recorde de focos de queimadas na Amazônia desde 1999 e no Pará desde 2011, 46% a mais que o ano anterior e também por ter registrado um expressivo aumento de queimadas em todo o estado, depois de quase uma década de notável diminuição (INPE, 2018). Vale destacar que apesar deste ano apresentar precipitações dentro da normal climatológica, a cobertura vegetal na região sofreu fortes efeitos da

redução das chuvas, durante os dois anos anteriores de 2015 e 2016, mencionados na literatura como anos de El Niño forte e prolongado (CUNHA et al., 2019). A Figura 4.2 mostra que em 2017, o fogo apresentou um preocupante avanço em áreas até então pouco comuns para tantos registros de incêndios florestais, próximas ao município de Santarém, como unidades de conservação (UC), aldeias indígenas, chegando a alcançar 50,4% das UC's de todo o Brasil. Dentre os estados brasileiros, o Pará foi o que mais registrou incêndios florestais, com quase 50 mil focos no total (MELO et al., 2018; INPE, 2018).

Figura 4.2 - Localização dos biomas brasileiros com maior percentual de queimadas em 2017. Em destaque, o percentual de unidades de conservação atingidas pelas queimadas florestais, com 50,4% para a Amazônia legal.



Fonte: Adaptado de O GLOBO / IMAZON / INPE / ICMBio (2018).

Para a realização deste estudo de caso, foi feito um delineamento ecológico de série temporal de carácter epidemiológico, referente ao ano de 2017 selecionado para esta pesquisa. Para o ano mencionado, foram utilizadas estimativas de concentrações diárias de material particulado fino (PM_{2.5}) obtidas através do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde (SISAM), plataforma vinculada ao INPE, em parceria com o Ministério da Saúde e a Organização Pan-americana da Saúde, vastamente utilizada em diversos trabalhos sobre poluição atmosférica (CARMO; ALVES; HACON, 2013; MACHIN; NASCIMENTO, 2018; SISAM, 2009). O SISAM utiliza

estimativas de $PM_{2.5}$ com valores próximos à superfície extraídos dos modelos CAMS, pertencente ao centro europeu ECMWF e MERRA-2 pertencente à NASA (HE et al., 2019; SONG et al., 2018), para os horários de 00, 06, 12 e 18 UTC, com resolução de 12,5 Km para o ponto de grade que contém a localização da sede de cada município escolhido.

O número de internações hospitalares e atendimentos ambulatoriais por doenças respiratórias foram obtidos através do DATASUS, na plataforma TABNET do Ministério da Saúde, incluindo as internações causadas por todas as doenças respiratórias classificadas no CID-10 (www.datasus.gov.br). Foi calculado o número de internações para crianças na faixa etária de 1 a 9 anos de idade (LEÃO et al., 2011). O número de crianças na mesma faixa etária foi obtido usando estimativa populacional para 2021. É importante esclarecer que o grupo etário pesquisado foi escolhido para ambos os sexos, residentes nos municípios estudados, por ser considerado um grupo bastante vulnerável às complicações de doenças no trato respiratório (ANDRADE FILHO et al., 2013; CARMO et al., 2010; IGNOTTI et al., 2007; OLIVEIRA, 2017; SMITH et al., 2014;). Para facilitar o entendimento e o acompanhamento das tendências temporais, foram calculadas as taxas mensais de internações hospitalares da faixa etária escolhida a cada mil habitantes para cada município.

Para todas as variáveis utilizadas neste estudo, foram calculadas médias diárias e mensais que, posteriormente, foram aplicadas ao modelo estatístico de regressão linear, onde a variável dependente (Y) é a taxa de internação hospitalar (variável social) e as variáveis independentes ($X_1, X_2, X_3 \dots X_n$) são as demais variáveis ambientais, como focos de queimadas e o $PM_{2.5}$. A taxa de internação hospitalar foi calculada a partir do número de registros mensais de internações em crianças até nove anos de idade, a cada mil habitantes, para cada município.

O termo que corresponde ao poluente atmosférico foi adicionado ao modelo, assumindo-se que a associação das concentrações diárias de $PM_{2.5}$ com a variável independente é linear para um intervalo de confiança preestabelecido de 95% e p-valor $< 0,05$ (CARMO et al., 2013; MACHIN; NASCIMENTO, 2018).

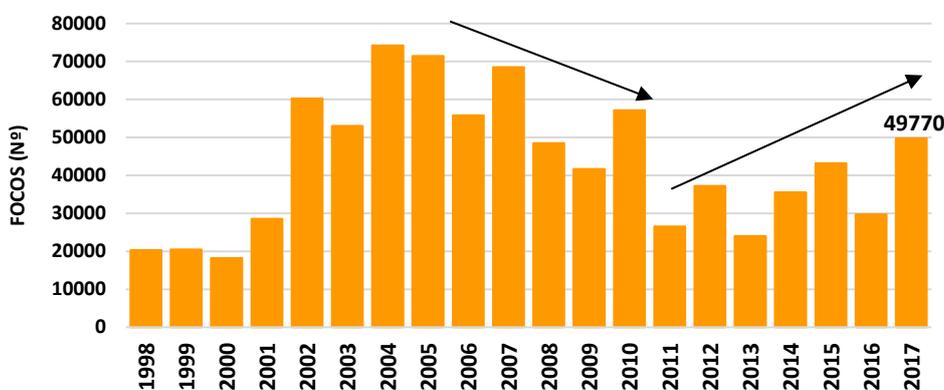
4.3 Resultados e Discussão

Apesar do maior investimento em monitoramento ambiental e da criação de políticas públicas desde 2004, o estado do Pará registrou uma expressiva tendência de

aumento das queimadas florestais, a partir de 2011, chegando a números alarmantes de focos de queimadas em 2017, o maior em sete anos (49.770), como mostra a Figura 4.3.

Segundo Mello e Artaxo (2017), as mudanças de uso do solo na Amazônia Legal são altamente heterogêneas, tanto no espaço, quanto no tempo. A paisagem atual da região amazônica deriva das diferentes fases de desenvolvimento ocorridas ao longo dos últimos 50 anos, principalmente a partir do governo militar. Estudos mostram que o comportamento da série de queimadas é regido pela série de desmatamento, a qual apresenta as mesmas tendências (CASTELO; ADAMI; SANTOS, 2020). O aumento das queimadas florestais a partir de 2011, pode ser explicado pelo aumento do custo de fiscalização pelos órgãos ambientais responsáveis (MELLO; ARTAXO, 2017), fato que contempla a terceira fase da política de comando e controle do desmatamento na Amazônia (PPCDam), a qual trouxe, nas primeiras fases, avanços expressivos em relação ao combate ao desmatamento na Amazônia, mas que no atual momento apresenta limitações no que se refere à fiscalização e recursos humanos para a proteção da floresta.

Figura 4.3 – Série temporal do número de focos de queimadas em 20 anos (1998-2017) no estado do Pará, mostrando as tendências de diminuição e aumento de incêndios florestais por todo o estado, com destaque para 2017 com quase 50 mil focos registrados.

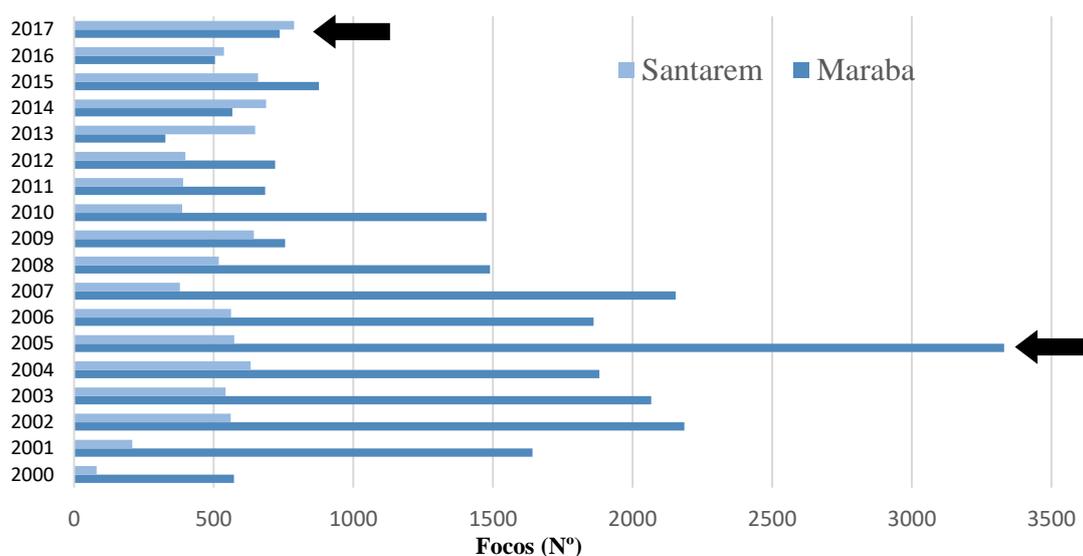


Por outro lado, as características ambientais do município de Marabá, no arco do desmatamento, deflagram o solo e suas características naturais bastante modificadas em sua quase totalidade, resultado de um processo de muitos anos de mudanças no uso da terra, como pode ser visto na Figura 4.4, onde Marabá tinha, explicitamente, os maiores quantitativos de queimadas em relação a Santarém em 2005, porém esta situação se inverte nos anos finais da série histórica, como em 2017.

Estudos mostram que locais que apresentam maior devastação natural sentem com maior intensidade os efeitos diretos e indiretos de variáveis climáticas e sociais, como o volume de chuvas locais, por exemplo, apresentando grandes diferenças em ambos os locais (GONÇALVES et al., 2010), o que torna o ar mais poluído, já que a chuva tem um importante papel de limpar a atmosfera, removendo partículas de aerossóis em suspensão.

No caso específico de 2005, a Amazônia sofreu com uma seca sem precedentes, provocada por anomalias de TSM no Atlântico tropical (MARENGO et al., 2008), resultando em um déficit hídrico que alterou todo o ciclo hidrológico local, aumentando significativamente as queimadas florestais e, conseqüentemente, a poluição do ar no centro urbano de Marabá.

Figura 4.4 – Série temporal de focos de queimadas na escala anual (2000-2017) para os municípios de Marabá e Santarém, com destaque para 2005 e 2017, onde os maiores quantitativos se invertem no final da série, mostrando maiores números em Santarém.



Mesmo com a região de Santarém estando sob atuação dos mesmos fenômenos climáticos, ao longo da série temporal, a maior preservação das características naturais não permite um quantitativo tão expressivo das queimadas, como em Marabá, como pode ser observado ao longo da série histórica de 2000 a 2017, fato que revela a importância da manutenção da floresta (DEBORTOLI et al., 2017). No entanto, com o avanço do desmatamento na região do baixo Amazonas, incluindo o desmatamento ilegal em unidades de conservação, Santarém passou a apresentar grandes números de

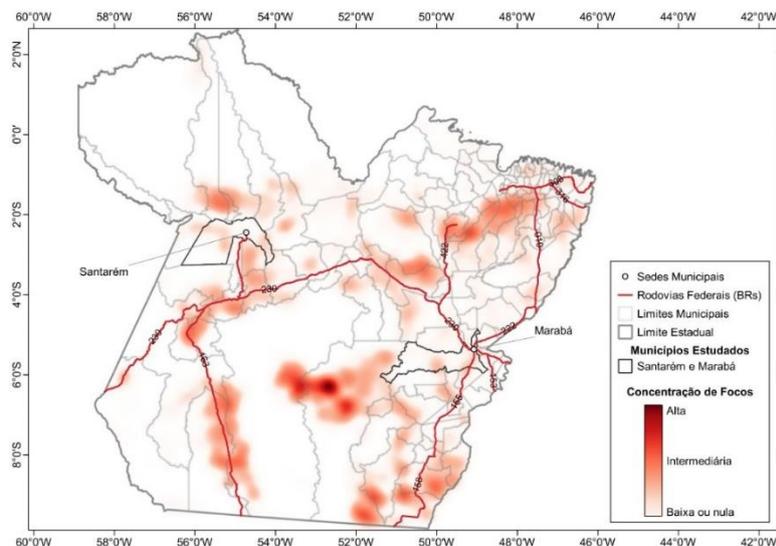
focos de queimadas, chegando a ultrapassar Marabá, como foi o caso de 2017 (Figura 4.4).

Diante de um cenário favorável às queimadas florestais, ainda em alta, no município de Marabá e com um notório avanço na região de Santarém, estes resultados mostram que se nada for feito para amenizar esse problema, os danos ambientais e sociais serão graves e irreversíveis, associado ao processo de mudanças climáticas, principalmente para a região de Santarém, que já responde aos efeitos das queimadas sem precedentes.

A Figura 4.5 traz uma espacialização da densidade de focos de queimadas em todo o estado do Pará, durante o ano de 2017. Nota-se que a maior parte dos focos de incêndios concentra-se ao longo das grandes rodovias federais, principalmente a BR-163 conhecida como Cuiabá-Santarém e que as regiões do entorno do município de Santarém apresentam grande quantidade de incêndios no acumulado anual, fato que pode alterar a qualidade do ar deste município por causa do transporte de aerossóis de queimadas, via escoamento do vento (KAUFMAN et al., 1998). Estudos mostram que o tipo de aerossol gerado pelas queimadas tem grande capacidade de dispersão por centenas de quilômetros produzindo plumas de poluição em larga escala (FIOCRUZ, 2019).

Observa-se ainda na Figura 4.5 que 2017 apresenta grandes quantidades de focos de queimadas ao longo da BR-010 (Belém-Brasília), no sudeste do estado, porém em menor quantidade, incluindo a região de Marabá. Estudos mostram que esta região apresenta um solo bastante modificado, resultado das mudanças no uso da terra, principalmente por causa da intensa atividade agropecuária, siderúrgica e da mineração, o que promoveu ao longo de décadas, desmatamento, queimadas e poluição do ar (PRATES; BACHA, 2011). Logo, sugere-se que ao final da série não há tanta biomassa para combustão, como acontece em Santarém. Observa-se também um expressivo número de focos de queimadas ao longo da rodovia BR-230. Grandes rodovias estaduais e federais como a Transamazônica (BR-230) e a Cuiabá-Santarém (BR-163) atraem grandes investimentos e ocupação desordenada, resultando na queima desordenada da biomassa florestal ao longo de sua extensão (SOUZA; GUERRA, 2017), como mostra a espacialização feita pela Figura 4.5.

Figura 4.5 – Acumulado de focos de queimadas referente ao ano de 2017 no estado do Pará, com ênfase na malha rodoviária e nos municípios de Marabá, no sudeste do estado e Santarém, na região do baixo Amazonas.



A Figura 4.6 mostra a variação mensal do quantitativo total de focos de queimadas, material particulado fino ($PM_{2.5}$) e da taxa de internações hospitalares ao longo de 2017 para os municípios de Marabá e Santarém, com maiores números observados no segundo semestre, para as três variáveis em questão, coincidindo com a estação seca. Nota-se que os dois municípios apresentam comportamento diferenciado em relação aos incêndios florestais, quando Marabá atinge o pico de queimadas no mês de setembro, enquanto Santarém apresenta o pico em novembro.

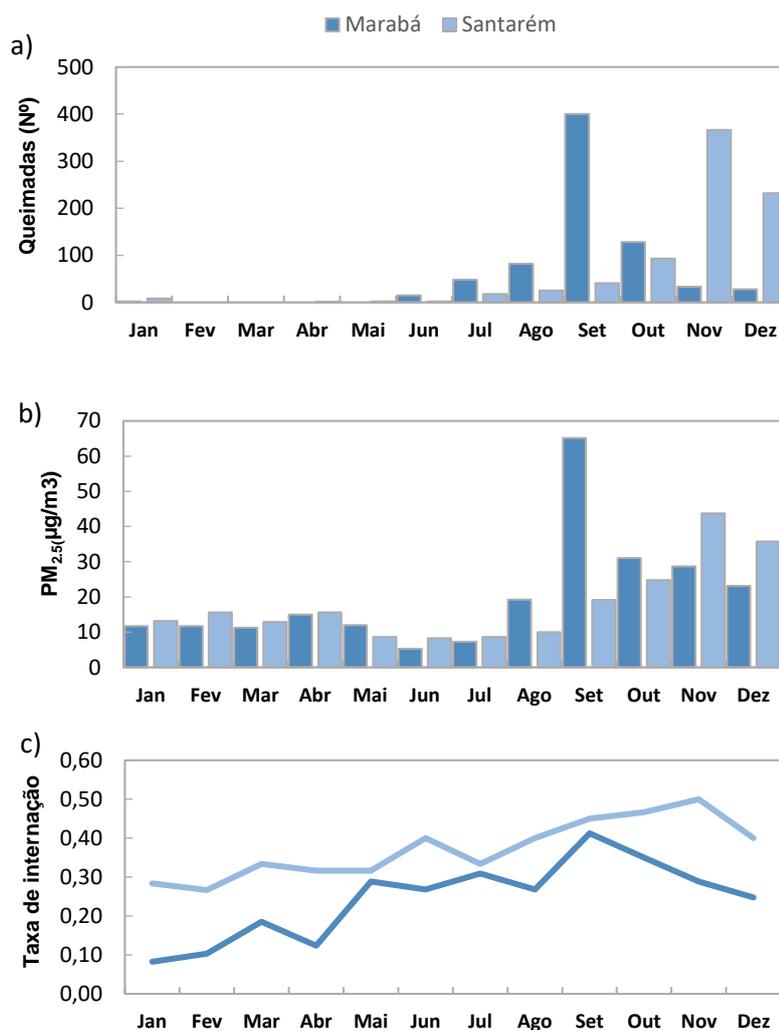
O $PM_{2.5}$ segue a mesma tendência para cada município, com pequenas diferenças no segundo semestre, onde os números ultrapassam $10 \mu g/m^3$, o que pode ter origem de outras fontes poluidoras (Figura 4.6b). A análise mensal mostra que a taxa de registros hospitalares (Figura 4.6c) aumenta significativamente no segundo semestre de 2017, acompanhando a série temporal de focos de queimadas e do $PM_{2.5}$, quando Marabá atinge a maior taxa (0,45) em setembro e Santarém (0,50) em novembro, coincidindo com as queimadas.

Diferente da maioria dos anos anteriores, desde o início do levantamento feito pelo INPE, 2017 foi o ano em que Santarém apresentou um maior quantitativo de focos de queimadas (788) e de internações, superando o município de Marabá no acumulado anual. Esses números são motivo de grande preocupação para as autoridades ambientais e sanitárias, devido ao entorno do município de Santarém apresentar muitas unidades de conservação (UC's), o que denuncia uma série de crimes ambientais, principalmente ao

longo da rodovia Cuiabá-Santarém (BISTENE; GUIMARÃES, 2019). Segundo estes autores, a fragilidade na fiscalização e na legislação ambiental por parte de órgãos governamentais, somadas ao crescimento da monocultura e à limitação do tamanho de terrenos em propriedades do sul e sudeste do Brasil, fortaleceram o processo de migração para a região do baixo Amazonas, no oeste do Pará.

Segundo Coy et al. (2018), o processo de migração para o norte do Brasil reconfigura a expansão fundiária, aumentando o desmatamento ilegal e, conseqüentemente, o número de incêndios florestais até mesmo dentro de unidades de conservação, o que traz um alerta à comunidade científica, ambientalistas e outras autoridades ligadas ao meio ambiente.

Figura 4.6 – Variabilidade mensal do número de focos de queimadas nos municípios de Marabá e Santarém, ao longo do ano de 2017. a) focos de queimadas, b) $PM_{2.5}$, c) taxa de internação hospitalar por doenças respiratórias.

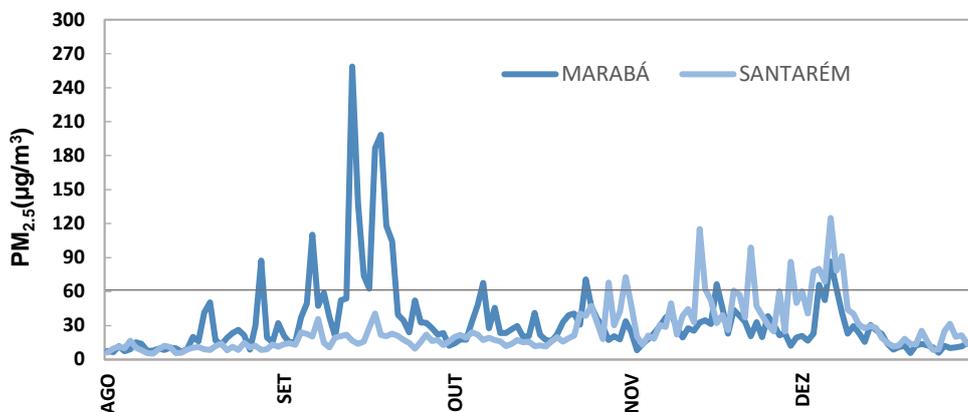


Diante das análises anteriores, fica evidente que as queimadas florestais têm avançado expressivamente para regiões até então pouco afetadas, como é o caso da região do baixo Amazonas, no oeste do Pará. Isso traz consequências graves como o aumento da poluição do ar no município e das internações hospitalares por doenças respiratórias em grupos mais vulneráveis, como é o caso de crianças com idade de 0 a 9 anos de idade, como mostrou Moura et al. (2021), quando constatou que o número de internações hospitalares por doenças respiratórias em Santarém não apresenta uma tendência de diminuição em dezoito anos de análise, o que pode ser provocado pelo aumento dos incêndios florestais e por variações no clima local.

A Figura 4.7 mostra o comportamento diário do $PM_{2.5}$ no segundo semestre de 2017, período que coincide com a época de queimadas florestais em Marabá e Santarém. A nova resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2018) estabelece padrões de qualidade do ar em relação à média diária de $PM_{2.5}$ em centros urbanos, logo não deve ultrapassar $60 \mu g/m^3$, sendo assim a atmosfera do município em questão classificada como poluída e insalubre para a sobrevivência, principalmente para grupos mais vulneráveis como é o caso de crianças (ANDREÃO; ALBUQUERQUE, 2020; FERNANDES et al., 2020).

Ressalta-se que ao longo da estação seca, Marabá atinge, de agosto a dezembro, o limiar estabelecido pela legislação brasileira, sendo que no mês de setembro, os valores chegam a mais de $240 \mu g/m^3$ em 24 horas, considerado nível de emergência pelas autoridades ambientais, refletindo na maior taxa de internações hospitalares no mesmo mês, resultados confirmados anteriormente na Figura 4.6c. Em relação a Santarém, não foi observado níveis de emergência ou de alerta, porém durante quase todo o mês de novembro, o município atingiu o limiar estabelecido, também coincidindo com a maior taxa de internações hospitalares por doenças respiratórias para o mesmo mês de análise (Figura 4.6c).

Figura 4.7 - Variabilidade diária do $PM_{2.5}$ durante o período de queimadas de 2017 (AGO-DEZ). O gráfico mostra o limiar diário de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estabelecido pelo CONAMA (Resolução 491/2018), conforme o padrão de qualidade do ar intermediário (PI-1).



Marabá registrou níveis de poluição por $PM_{2.5}$, acima de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, durante nove dias, nos meses de agosto e setembro, sendo seis dias com níveis acima de $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$, considerado nível de atenção e um dia acima de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$, considerado nível de emergência (CONAMA, 2018).

Santarém registrou 14 dias com níveis acima de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nos meses de outubro e novembro, acima das diretrizes estabelecidas pela legislação, porém com menor intensidade, apenas um dia com nível de atenção ($125 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Em geral, nossos resultados mostram que os dois municípios estudados apresentaram baixa qualidade do ar em 2017, mostrando uma atmosfera poluída e com riscos à saúde pública, situação caracterizada pela presença de altas concentrações de aerossóis de queimadas na atmosfera em um curto período de tempo, resultado da ocorrência de condições ambientais desfavoráveis à dispersão dos mesmos, como as meteorológicas, por exemplo, como estabelece a legislação brasileira.

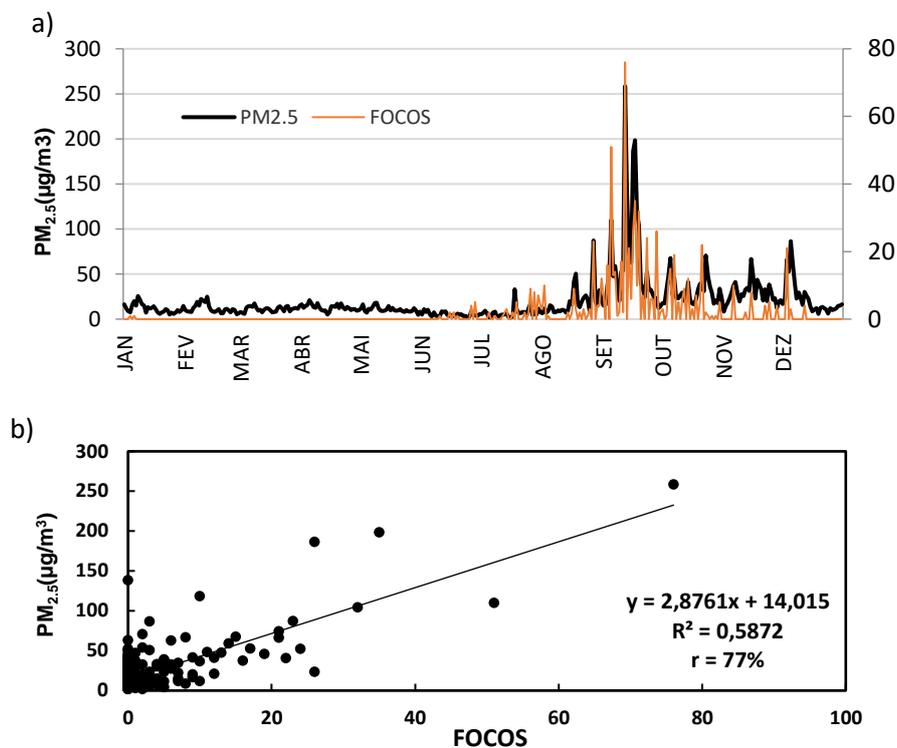
A série temporal da média diária de focos de queimadas e de $PM_{2.5}$ emitido pela queima da biomassa em 2017 no município de Marabá é mostrada na Figura 4.8. Observa-se que o número de focos de queimadas é predominante no segundo semestre, com pico em setembro, chegando a 76 focos em um único dia. O $PM_{2.5}$ também apresenta o mesmo comportamento, com pico máximo em setembro ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), no auge da estação seca (Figura 4.8a). A correlação entre as duas variáveis se mostrou positiva, com 77% de correlação, deixando evidente que em 2017, o aumento das queimadas no município levou a um aumento na poluição atmosférica (Figura 8b). Em Marabá, o maior déficit de chuvas e de umidade ocorre no trimestre SET-OUT-NOV,

deixando a vegetação mais seca e susceptível ao fogo após o corte raso da madeira, levando tempo considerável para renovar suas características naturais, muito comum em municípios localizados no arco do desmatamento como mostram estudos voltados a essa temática (ALMADA et al., 2019).

O primeiro semestre, apesar de apresentar poucos registros de focos de queimadas, Marabá mostra valores acentuados de $PM_{2.5}$ mesmo na estação chuvosa (dez-mai), quando as queimadas florestais tendem a diminuir consideravelmente. Esse comportamento do $PM_{2.5}$ na estação das chuvas chama atenção para outros tipos de material particulado que podem ser prejudiciais para o meio ambiente e para a saúde das pessoas, como é o caso dos poluentes originados pelo processo de extração do minério, atividade bastante desenvolvida na região de Marabá e arredores, o que pode elevar o valor do $PM_{2.5}$ mesmo em períodos mais úmidos (BARROSO et al., 2021), podendo eventualmente levar a um número maior de crianças a manifestarem comorbidades respiratórias e procurarem atendimento médico. Dentro dessa temática, um estudo feito por Braga et al. (2007) mostrou que municípios com intensa atividade mineradora além de apresentar baixa qualidade do ar, registra grande número de internações por doenças respiratórias coincidentemente em períodos de maior intensificação da extração do minério, elevando o $PM_{2.5}$.

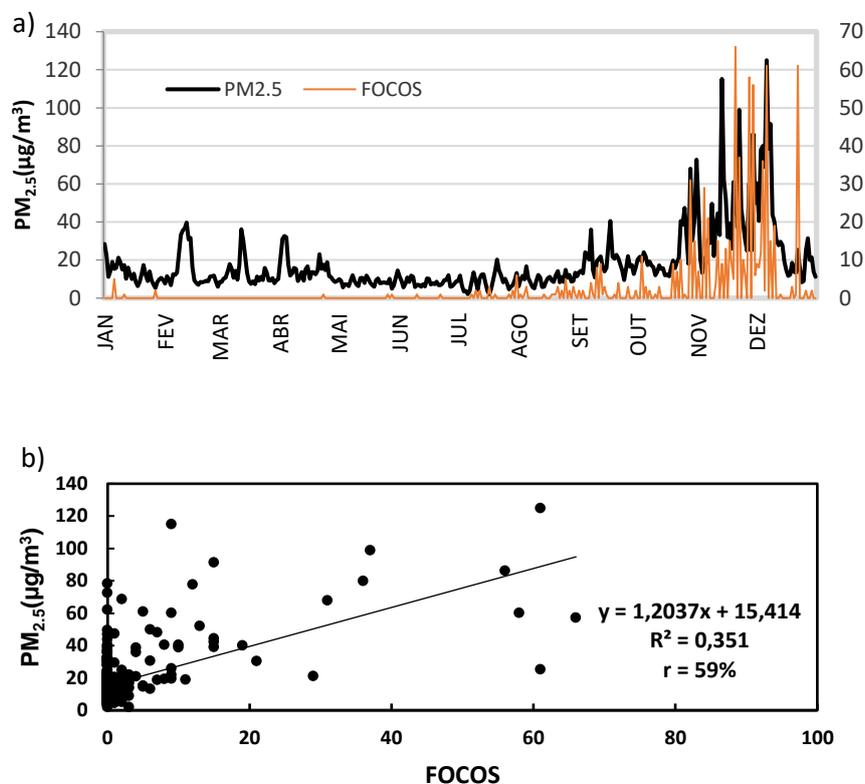
Em suma, na estação chuvosa a atmosfera fica mais limpa e salubre, no entanto, Milanez (2017) mostra que não é só pela lavra do minério que os aerossóis atmosféricos de diâmetros diferentes são levados das minas até os centros urbanos, muitas vezes esse poluente é levado pela poeira e pela lama contida em ônibus e caminhões que prestam serviço às mineradoras, fazendo com que durante todo o ano, o município apresente uma variabilidade no valor do $PM_{2.5}$.

Figura 4.8 - Associação entre $PM_{2.5}$ e focos de queimadas para Marabá-PA em 2017. a) Distribuição da média diária; b) Modelo de regressão linear com 77% de correlação entre as variáveis envolvidas.



A Figura 4.9a faz a mesma análise da figura anterior, porém para o município de Santarém. Observa-se que em 2017, os maiores valores, tanto para focos de queimadas como para $PM_{2.5}$, tiveram picos no bimestre NOV-DEZ, diferente de Marabá onde o pico ocorre em setembro, no entanto é importante ressaltar que o município de Santarém, mesmo com áreas de florestas mais preservadas, apresentou em 2017 elevadas quantidades diárias de $PM_{2.5}$ durante todo o ano, mesmo na estação chuvosa onde há poucos registros de queimadas. Esses resultados evidenciam o avanço da ocupação de terras nos últimos anos, desmatamento ilegal em unidades de conservação e a utilização do fogo para o manejo de diversas atividades humanas em regiões próximas a Santarém.

Figura 4.9 - Associação entre $PM_{2.5}$ e focos de queimadas para Santarém-PA em 2017. a) Distribuição da média diária; b) Modelo de regressão linear com 59% de correlação entre as variáveis envolvidas.



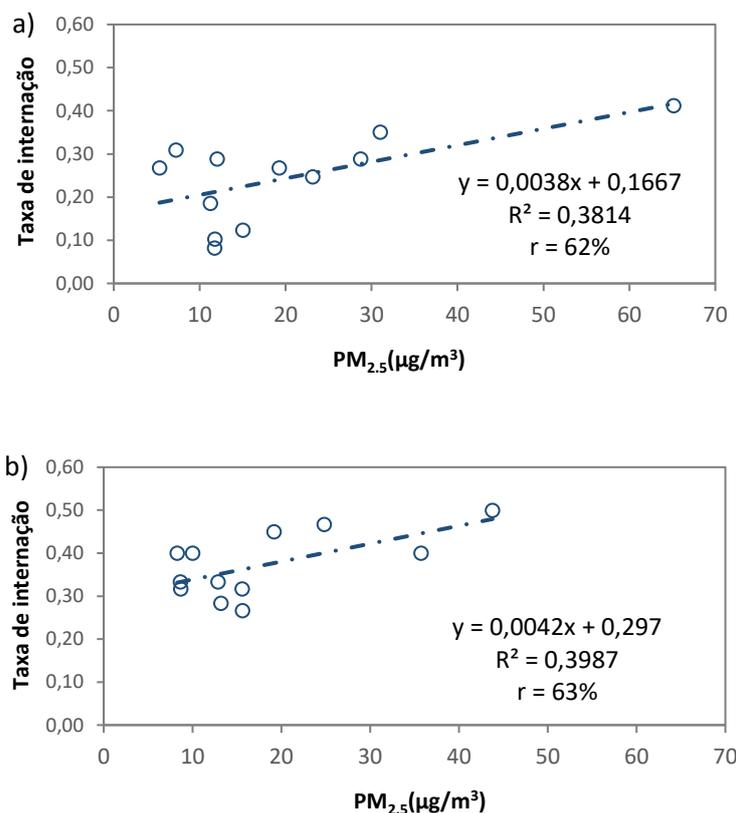
Estudos mostram que incentivos fiscais com isenção de impostos atraíram grandes empresas para a região de Marabá, com destaque para a indústria mineradora, com isso, ao longo de rodovias federais e estaduais que cortam a região, se instalaram grandes propriedades de terra para o manejo de madeira, pecuária, além da expansão da agricultura. Segundo Prates e Rocha (2011), todas essas atividades inseridas em um modelo econômico de desenvolvimento da região desde a década de 1980, influenciam de forma direta e indireta a prática do desmatamento e das queimadas florestais.

Do ponto de vista climático e ambiental, torna-se importante destacar com base na área de estudo desta pesquisa, que os dois municípios investigados neste trabalho possuem características naturais muito diferentes, tendo em vista que o desmatamento e as queimadas causam um desequilíbrio microclimático e altera o ciclo hidrológico local (DEBORTOLI et al., 2016; PIRES; COSTA, 2013).

A associação entre o material particulado fino ($PM_{2.5}$) e a taxa de registros hospitalares mostrou forte correlação (Figura 4.10) para o ano de 2017. Em Santarém, houve aumento na taxa de registros de internações por doenças respiratórias, com média anual de 18, valor que em associação com o parâmetro de poluição atmosférica,

mostrou correlação de 63%, com intervalo de confiança de 95%, mostrando que o alto nível de poluição por partículas finas de aerossóis reflete diretamente no acometimento de doenças no trato respiratório de crianças até nove anos de idade.

Figura 4.10 - Análise de regressão linear da média mensal entre $PM_{2,5}$ e internações hospitalares referente ao ano de 2017, com intervalo de confiança de 95% e p-valor $< 0,005$. a) Marabá-PA; b) Santarém-PA.



Marabá também mostrou alta correlação entre as mesmas variáveis associadas (Figura 4.10a), com correlação de 61,7%, e intervalo de confiança de 95%. Historicamente, o município de Marabá apresenta um alto grau de poluição atmosférica por queimadas, quando chegou a atingir valores alarmantes em 2017, porém neste episódio ficando abaixo de Santarém, tanto no quantitativo de queimadas, como no atendimento hospitalar por doenças respiratórias.

Considerando os referenciais de qualidade do ar recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e pelo programa nacional de controle da qualidade do ar (PRONAR), torna-se importante para os municípios de Marabá e Santarém, além de outros que venham apresentar uma atmosfera poluída por causa das queimadas florestais, a criação de instrumentos de gestão pública que venham monitorar, diagnosticar e prever danos ambientais e à saúde pública, no sentido de evitar sequelas

irreversíveis, mortes e prejuízos econômicos. Vale ressaltar que estudos desta natureza para o estado do Pará ainda são incipientes na literatura científica, principalmente no que se refere a municípios específicos como é o caso de Marabá e Santarém, apesar do conteúdo tratar de assuntos necessários e atuais que estão constantemente em pauta na mídia mundial.

4.4 Conclusões

Este trabalho investigou as consequências ambientais e sociais causadas pelo intenso processo de queimadas em 2017, no estado do Pará. Com base nos resultados encontrados, conclui-se que:

- As queimadas florestais mostraram um preocupante aumento em todo o estado do Pará, inclusive em áreas protegidas por lei na região oeste, o que denuncia a prática de crimes ambientais e a fragilidade na fiscalização por parte de órgãos competentes;
- Diferentemente de anos anteriores, Santarém apresentou um aumento expressivo no número de queimadas florestais, poluição atmosférica e internações hospitalares, chegando a superar o município de Marabá, o que sugere um avanço do desmatamento, seguido de queimadas no município e regiões adjacentes constituídas por unidades de conservação ambiental;
- Ficou constatado que 2017 foi um ano anômalo em relação ao grande número de focos de queimadas em todo o estado do Pará, com maior valor de $PM_{2.5}$, o qual reflete a poluição atmosférica nos locais estudados e, conseqüentemente, o número de internações hospitalares por doenças respiratórias em crianças de 1 a 9 anos de idade, principalmente no segundo semestre. Na análise mensal, verificou-se que os municípios de Marabá e Santarém apresentaram picos de $PM_{2.5}$ em diferentes épocas do ano, sendo estes acompanhados do aumento da taxa de internações hospitalares por doenças respiratórias;
- O modelo de regressão mostrou forte correlação estatística entre as variáveis material particulado fino ($PM_{2.5}$) e queimadas florestais, e posteriormente com a taxa de internações hospitalares por doenças respiratórias, confirmando estatisticamente que

quanto maior a poluição do ar por queimadas florestais, maior o número de atendimentos hospitalares por enfermidades respiratórias;

- Com base na legislação ambiental, os dois municípios apresentaram baixa qualidade do ar, ultrapassando o limiar, a cada 24 horas, estabelecido pelos órgãos reguladores, principalmente no segundo semestre, situação coincidente com o número de focos de queimadas e de internações hospitalares;
- Apesar desta pesquisa não ter utilizado a base diária para internações hospitalares por doenças respiratórias, os resultados se mostraram bastante coerentes com as demais séries temporais, mostrando que é possível se extrair informações importantes e consistentes, mesmo em uma escala temporal mais ampla;
- Esta pesquisa mostrou de forma sucinta, em um episódio de grandes queimadas florestais, como a poluição do ar pode trazer riscos à saúde pública do estado do Pará, em um pequeno intervalo de tempo, mesmo em regiões de floresta pouco antropizadas, podendo desencadear sequelas graves a grupos mais vulneráveis e acelerar a superlotação de leitos clínicos e de UTI's nas redes pública e privada de saúde. Portanto, espera-se que trabalhos voltados a esta temática, venham contribuir cientificamente para uma melhor qualidade de vida e alertar as autoridades governamentais na elaboração de políticas públicas para poluição atmosférica, bem como na criação de uma rede de monitoramento da qualidade do ar em pontos específicos do estado do Pará. Novos estudos devem ser desenvolvidos com o intuito de elucidar/explicar qual a real contribuição dos focos de queimada ilegal daqueles ocasionados por fenômenos de variabilidade climática natural, bem como seus efeitos individuais sobre as taxas de internação hospitalar na Amazônia.

REFERÊNCIAS

ALMADA, H.K.; SILVÉRIO, D. V.; MARACAHIPES-SANTOS, L.; MACEDO, M. N.; ZARATIM, E. C. P.; ZARATIM, K. P.; UMETSU, R. K. Effects of geomorphology and land use on stream water quality in southeastern Amazonia. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 5, p. 620-632, 2019.

ANDRADE FILHO, V.; ARTAXO, P.; HACON, S.; CARMO, C.; CIRINO, G., Aerossóis de queimadas e doenças respiratórias em crianças, Manaus, Brasil. **Revista de Saúde Pública**, v. 47, p. 239-247, 2013.

ANDREÃO, W.; ALBUQUERQUE, T. Fine particles as a public health indicator in Brazil: from monitoring to modeling. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 13, n. 12, p. 1-11, 2020.

BANDEIRA CASTELO, T.; ADAMI, M.; NASCIMENTO DOS SANTOS, R. Fronteira Agrícola e a política de priorização dos municípios no combate ao desmatamento no estado do Pará, Amazônia. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 28, n. 2, p. 434-457, 2020.

BARROSO, A.; MOGO, S.; SILVA, M.; CACHORRO, V.; de FRUTOS, Á. Morphology, Mineralogy, and Chemistry of Atmospheric Aerosols Nearby an Active Mining Area: Aljustrel Mine (SW Portugal). **Atmosphere**, v. 12, n. 3, p. 333, 2021.

BISTENE, M.; GUIMARÃES, J. Desmatamento, população e desenvolvimento econômico no oeste do Pará nos eixos das Rodovias Santarém-Cuiabá e Transamazônica. **Natural Resources**, v. 9, n. 2, p. 19-35, 2019.

BITTENCOURT, O.O.; MORELLI, F.; JÚNIOR, C.A.S.; SANTOS, R. An Approach to Classify Burned Areas Using Few Previously Validated Samples. In: **International Conference on Computational Science and Its Applications**. Springer, p. 239-254, 2020.

BRAGA, A.L.F. et al. Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 23, p. 570-578, 2007.

BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Banco de dados do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde - SISAM**. Disponível em <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/sisam/v2/> [Acessado em 10 de abril de 2020].

BRASIL, Ministério da Economia. **Banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/> [Acessado em 3 de janeiro de 2021].

BRASIL, Ministério da Saúde. **Banco de dados do Sistema Único de Saúde-DATASUS**. Disponível em <http://www.datasus.gov.br> [Acessado em 3 de julho de 2017].

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n.491**, de 19 de novembro de 2018. O Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, estabelece Padrões Nacionais de Qualidade do Ar. Diário Oficial da União, Brasília, Seção 1, p. 155.

Brasil termina 2017 com número recorde de queimadas desde 1999. **O Globo**, Rio de Janeiro, 2018.

BUTT, E.W.; CONIBEAR, L.; REDDINGTON, C.L.; DARBYSHIRE, E.; MORGAN, W.T.; COE, H.; SPRACKLEN, D.V. Large air quality and human health impacts due to Amazon forest and vegetation fires. **Environmental Research Communications**, v. 2, n. 9, p. 095001, 2020.

CARMO, C.N.; ALVES, M.B.; HACON, S. Impact of biomass burning and weather conditions on children's health in a city of Western Amazon region. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 6, n. 2, p. 517-525, 2013.

COY, M.; KINGLER, M. Frentes pioneiras em transformação: o eixo da BR-163 e os desafios socioambientais. **Revista Territórios e Fronteiras**, v.7, p. 1-26, 2014.

CUNHA, A.P.; MARENGO, J.A.; ALVALA, R.C.; DEUSDARA-LEAL, K.R.; CUARTAS, L.A.; SELUCHI, M.; ZERI, M.; RIBEIRO-NETO, G.; BRODEL, E.; CUNNINGHAM, C.; COSTA, L.; MORAES, O.L.L. Secas e seus impactos no Brasil em 2018. **CEMADEN**, São José dos Campos, SP, n. 1, p. 1-19, 2019.

DEBORTOLI, N.; DUBREUIL, V.; HIROTA, M.; FILHO, S.; LINDOSO, D.; NABUCET, J. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 6, p. 2889-2900, 2017.

FERNANDES, M.A.O; ANDREÃO, W.L., MACIEL, F.M.; ALBUQUERQUE, T. T. A. Avoiding hospital admissions for respiratory system diseases by complying to the final Brazilian air quality standard: an estimate for Brazilian southeast capitals. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 29, p. 35889-35907, 2020.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ): BARCELLOS, C.; XAVIER, D.; HACON, S.; ARTAXO, P.; MAGALHÃES, M.; MATOS, V.; FEITOSA, P. Queimadas na Amazônia e seus impactos na saúde: a incidência de doenças respiratórias no sul da Amazônia aumentou. **Observatório de Clima e Saúde**, Fundação Oswaldo Cruz (FioCruz), 2019. (3º Informe técnico do Observatório de Clima e Saúde).

GONÇALVES, F.; BEHENG, K.; MASSAMBANI, O.; VAUTZ, W.; KLOCKOW, D. Processos de remoção de material particulado atmosférico: uma modelagem numérica de estudo de casos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, p. 437-447, 2010.

GONTIJO, G.A.B.; PEREIRA, A.A.; OLIVEIRA, E.D.S.; JÚNIOR, F.W.A. Detecção de queimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de sensoriamento remoto. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, v. 15, p. 7966-7973, 2011.

HE, L.; LIN, A.; CHEN, X.; ZHOU, H.; ZHOU, Z.; HE, P. Assessment of MERRA-2 surface PM_{2.5} over the Yangtze River Basin: Ground-based verification, spatiotemporal distribution and meteorological dependence. **Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p. 460, 2019.

IGNOTTI, E.; HACON, S.; SILVA, A.M.C.; JUNGER, W.L.; CASTRO, H. Efeitos das queimadas na Amazônia: método de seleção dos municípios segundo indicadores de saúde. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 10, n. 4, p. 453-64, 2007.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA – IPAM. O ar é insuportável: relatório técnico. Brasília: **Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia**, 2020.

INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA - IMAZON. O Brasil termina 2017 com um número recorde de queimadas desde 1999. O **Globo**. Belém, 2017. (Nota de imprensa). Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/>. Acesso em: 12 de novembro de 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS -INPE: banco de dados. Disponível em: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal>. Acesso em: 03 abr. 2018.

KAUFMAN, Y.; HOBBS, P.; KIRCHHOFF, V.; ARTAXO, P.; REMER, L.; HOLBEN, B.; MATTOS, L. Smoke, clouds, and radiation-Brazil (SCAR-B) experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 103, n. 24, p. 31783-31808, 1998.

LEÃO, C.E.G.; ANDRADE, E.S.D.; FABRINI, D.S.; OLIVEIRA, R.A.D.; MACHADO, G.L.B.; GONTIJO, L.C. Epidemiologia das queimaduras no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Cirurgia Plástica**, v. 26, n. 4, p. 573-577, 2011.

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, p. 1-9, 2018.

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.; SAMPAIO G.; CAMARGO H.; ALVES, L.M. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate** v. 21, p. 495-516, 2008.

MELO, A.J.S.; ALVES, H.R.C.; FILHO, W.S.P. Detecção de queimadas e realização de mapas de calor utilizando produtos de sensoriamento remoto, e técnicas de geoprocessamento da região nordeste do Pará. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 10, n. 9, p. 114-142, 2018.

MELLO, N.G.R.; ARTAXO, P. Evolução do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal. **Revista do Instituto de Estudos Brasileiros**, n. 66, p. 108-129, 2017.

MILANEZ, B. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, n. 16, p. 1-10, 2017.

MOURA, M.N.; VITORINO, I.; CIRINO, G.; ANDRADE FILHO, V.S. The relationship between respiratory diseases and environmental conditions: a time series analysis in Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 4, n. 2, p. 34-56, 2021.

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 Medical Journal**, v. 134, p. 315-21, 2016.

OLIVEIRA, M.S. Poluição atmosférica e doenças cardiorrespiratórias. 1ªed. Curitiba: Appris, 2017. 131p.

OLIVEIRA, N.; VESSONI, A.T.; QUINET, A.; FORTUNATO, R.S.; KAJITANI, G.S.; PEIXOTO, M.S.; HACON, S.S.; ARTAXO, P.; SALDIVA, P.; MENCK, C.F.M.; BATISTUZZO, M.S.R. Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Scientific Reports**, v. 7, p. 10937, 2017.

PIRES, G.; COSTA, M. Deforestation causes different subregional effects on the Amazon bioclimatic equilibrium. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 14, p. 3618-3623, 2013.

PRATES, R.C.; BACHA, C.J.C. Os processos de desenvolvimento e desmatamento da Amazônia. **Economia e Sociedade**, v. 20, n. 43, p. 601-636, 2011.

RÖDIG, E.; KNAPP, N.; FISCHER, R.; BOHN, F.J.; DUBAYAH, R.; TANG, H.; HUTH, A. From small-scale forest structure to Amazon-wide carbon estimates,” **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1-7 [5080], 2019.

SMITH, L.T.; ARAGÃO, L.E.O.C.; SABEL, C.E.; NAKAYA, T. Drought impacts on children’s respiratory health in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v. 4, p. 1-7, 2014.

SONG, Z.; FU, D.; ZHANG, X.; WU, Y.; XIA, X.; HE, J.; CHE, H. Diurnal and seasonal variability of PM_{2.5} and AOD in North China plain: Comparison of MERRA-2 products and ground measurements. **Atmospheric Environment**, v. 191, p. 70-78, 2018.

SOUZA, C. M.; GUERRA, A. D. Propagandas, discursos e análises sobre Belo Monte em Altamira, Pará, Brasil. **Revista Agricultura Familiar: Pesquisa, Formação e Desenvolvimento**, v. 11, n. 2, p. 85-98, 2017.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO GERAL

5.1 Resultados Chaves: impactos e implicações

Esta pesquisa gerou informações sobre poluição atmosférica desencadeada por aerossóis provenientes de queimadas florestais, as quais lançam para a atmosfera material particulado fino substancialmente nocivo à saúde humana, principalmente a grupos mais vulneráveis como crianças abaixo de 9 anos de idade. Dos dois municípios estudadas nesta pesquisa, o que se localiza em áreas mais degradadas da floresta amazônica, se destacou com os maiores valores de focos de queimadas, profundidade óptica do aerossol (AOD), material particulado fino (PM_{2.5}) e temperatura do ar, o que deflagra uma atmosfera bastante poluída, principalmente na estação seca.

O município de Marabá sofre há anos com o processo de desmatamento e mudanças profundas no uso da terra, o que abriu possibilidades para diversas atividades industriais e agrícolas que geram poluição, com destaque para a poluição por queima da biomassa e pela mineração.

Os resultados desta pesquisa também mostraram que o município de Santarém vem apresentando um significativo e preocupante avanço nas queimadas florestais, fruto do crescente desmatamento na região, como mostram estudos recentes, situação que denuncia diversos crimes ambientais, uma vez que a região do entorno de Santarém é constituída por muitas unidades de conservação protegidas por lei.

Os picos de atendimentos a pacientes com síndromes respiratórias nos hospitais públicos de Marabá e Santarém, também estiveram entre os resultados mais importantes e preocupantes desta pesquisa, em geral no segundo semestre, tendo em vista que esta situação pode coincidir com períodos de epidemias respiratórias, resultando em um colapso na saúde pública do estado, com leitos clínicos e de UTI lotados e com poucos profissionais disponíveis para o atendimento da população.

Outros estudos já mostram outras implicações que a poluição por material particulado fino pode trazer à saúde humana, portanto se nada for feito para amenizar esse grave problema ambiental, espera-se em um futuro próximo, um número crescente de pacientes atendidos em hospitais e clínicas oncológicas com importantes alterações genéticas e com desenvolvimento de câncer de pulmão.

5.2 Conclusões de forma integrada

Em uma análise decadal, a série temporal dos índices climáticos escolhidos para este estudo mostrou modulação para as demais variáveis ambientais e de saúde, incluindo episódios de eventos climáticos em que essas variáveis apresentam valores acima ou abaixo da média climatológica.

Na escala sazonal, a estação seca é o período mais crítico tanto para números de focos de queimadas, AOD, PM_{2.5} e temperatura do ar, para Marabá e Santarém, com destaque novamente para Marabá, onde os níveis de poluição atingem valores alarmantes, acima do limiar estabelecido pela OMS. Devido ao aumento de áreas antropizadas no entorno de Marabá, a umidade relativa do ar foi a menor registrada em quase 20 anos de dados, portanto entende-se que um local pouco úmido, apresenta pouco volume de chuvas, aumentando a temperatura média, fatores cruciais para o aumento da poluição atmosférica.

Quando se analisou os dois municípios em um pequeno intervalo de tempo (um ano), ficou evidente que as internações hospitalares por doenças respiratórias seguem as mesmas tendências das variáveis ambientais, sendo assim estatisticamente dependente da variabilidade destas variáveis no tempo e no espaço. Marabá responde aos efeitos das queimadas florestais antecipadamente, em geral no mês de setembro, enquanto que Santarém responde aos mesmos efeitos ambientais e sociais, em novembro, diferença causada pela localização em áreas com características ambientais bastante diferentes do estado do Pará.

Em suma, conclui-se que ao longo de quase duas décadas, percebe-se que o efeito das queimadas não está associado ao que se queima em Marabá, mas sim por regiões adjacentes ao município, enquanto que em Santarém, o efeito das queimadas está associado ao que se queima dentro do próprio município. Em outras palavras, dependendo da localização do município, a população pode estar exposta a níveis elevados de poluição do ar, não necessariamente no local onde ocorre a exposição.

O desmatamento ilegal executado para diversas finalidades econômicas é a causa primária de todo o processo de poluição atmosférica em centros urbanos da Amazônia oriental, pois trata-se de um processo em cadeia em que um problema desencadeia outros, culminando em danos graves e irreversíveis para a população e para o meio ambiente.

5.3 Prioridades para pesquisas futuras

Algumas dificuldades foram encontradas ao longo deste estudo, entre elas a burocracia de órgãos públicos estaduais para a obtenção de dados diários de saúde pública. Diante da solicitação e do trâmite burocrático em andamento, fica como prioridade futura, o desenvolvimento de uma pesquisa com a mesma temática, porém dentro da escala diária para a detecção de efeitos a curto prazo da poluição atmosférica na saúde humana em centros urbanos, mediante o processo de mudanças climáticas.

Os estudos futuros sobre este tema tão atual e relevante podem ser desenvolvidos dentro de um projeto de pós-doutorado ou em parceria com empresas privadas do setor ambiental que tenham como ênfase a qualidade do ar em grandes centros.

5.4 Considerações Finais

Ainda há muito a se compreender e se investigar sobre os efeitos ambientais e sociais causados pela poluição atmosférica de queimadas florestais. Torna-se importante a criação de uma rede de monitoramento de material particulado em todo o estado do Pará, estado quase sempre líder no *ranking* de desmatamento e queimadas florestais, com geração de dados públicos e de fácil acesso à população.

Torna-se importante o fomento à pesquisa científica, desenvolvida no sentido de diagnosticar e apontar soluções para este problema tão nefasto ao meio ambiente.

Por último, torna-se fundamental a criação de políticas públicas, bem como o fortalecimento das que já existem, no sentido de mitigar problemas e episódios de altos níveis de poluição para a continuidade dos serviços ecossistêmicos e para uma melhor qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS

- ALVES, N.O.; VESSONI, A.T.; QUINET, A.; FORTUNATO, R.S.; KAJITANI, G.S.; PEIXOTO, M.S.; HACON, S.S.; ARTAXO, P.; SALDIVA. Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Nature**, v. 7, p. 10937, 2017.
- ANDRADE, C.W.L.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SOUSA LIMA, J.R.; ASSUNÇÃO MONTENEGRO, A.A.; MAGALHÃES, A. G. Modelagem hidrológica sob mudanças na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 239-248, 2017.
- ANDREAE, M.O.; ALMEIDA, S.S. de; ARTAXO, P.; BRANDÃO, C.; CARSWELL, F.E.; CICCIOLO, P.; CULF, A.; ESTEVES, J.L.; GASH, J.; GRACE, J.; KABAT, P.; LELIEVELD, J.; MALHI, Y.; MANZI, A.O.; MEIXNER, F.X.; NOBRE, A.; NOBRE, C.; RUIVO, M.A. de L.; SILVA DIAS, M.A.F.; STEFANI, P.; VALENTINI, R.; JOUANNE, J.V.; WATERLOO, M. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 8066 – 8091, 2002.
- ANDREAE, M.O.; ARTAXO, P.; FISCHER, H.; FREITAS, S.R. Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 6, p. 951-954, 2001.
- ARAÚJO, R.F.; FIRMINO, J.L.; GOMES FILHO, M.; DANTAS, R.T. Análise da relação da incidência de Infecção Respiratória Aguda (IRA) com as variáveis meteorológicas em Campina Grande. **Revista Fafibe**, n. 3, p. 1-5, 2007.
- ARTAXO, P.; GATTI, L.V.; LEAL, A.M.C.; LONGO, K.M., LARA, L.L., PROCÓPIO, A.S. Química atmosférica na Amazônia: A floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 185-98, 2005.
- ARTAXO, P.; LARA, L.B.L.S.; PAULIQUEVIS, T.M. Dry and wet deposition in Amazonia: from natural biogenic aerosols to biomass burning impacts. **IGAC. Newsletter**, v. 27, p. 12-16, 2003.
- ARTAXO, P.; MARTINS, J.V.; YAMASOE, M.A.; PROCÓPIO, A.S.; PAULIQUEVIS, T. M.; ANDREAE, M. O.; GUYON, P.; GATTI, L.V.; CORDOVA, A. M. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry season in Rondônia, Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 8.081–8.095, 2002.
- ARTAXO, P.; RIZZO, L.V.; PAIXÃO, M.; LUCCA, S.; OLIVEIRA, P.H.; LARA, L.L.; WIEDEMANN, K.T.; ANDRADE, M.O.; HOLBEM, B.; SCHAFER, J. Aerosol particles in Amazonia: their composition, role in the radiation balance, cloud formation, and nutrient cycles. *In: GASH, J. et al. (ed.). Amazonia and global change.* [Washington]: USA, 2009. p. 233-250. (American Geophysical Union, v. 186).

ARTAXO, P. *et al.* Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discuss.** v. 165, p. 203-235, 2013.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. 2. ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2011.

BELL, M.L.; PENG, R.D.; DOMINICI, F. The exposure–response curve for ozone and risk of mortality and the adequacy of current ozone regulations. **Environ Health Perspect**, v. 114, n. 4, p. 532-536, 2006.

BRASIL, Ministério da Economia. **Banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/> [Acessado em 3 de março de 2018].

BROOK, R.D.; BROOK, J.R.; URCH, B., VINCENT, R.; RAJAGOPALAN, S.; SILVERMAN, F. Inhalation of fine particulate air pollution and ozone causes acute arterial vasoconstriction in healthy adults. **Circulation**, v. 105, n. 13, p. 1534-6, 2002.

CARMO, C.N, HACON, S.S, LONGO, K.M, FREITAS, S., IGNOTTI, E., 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. 10-6, 2010.

CASTRO, H.; GONÇALVES, K.S.; HACON, S.S. Tendência da mortalidade por doenças respiratórias em idosos e as queimadas no estado de Rondônia / Brasil – período entre 1998 e 2005. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 14, n. 6, p. 2083-90, 2009.

CIRINO, G.G.; SOUZA, R.A.F.; ADAMS, D.K.; ARTAXO, P. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 13, p. 6523, 2014.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO -CETESB, Relatório. **Qualidade do ar n o estado de São Paulo**. São Paulo, SP: CETESB, 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução. 003**, de 19 de Novembro de 2018, 2018.

D'ALMEIDA, O.M.L.; VILHENA, A. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: Cempre; IPT, 2000.

DAVIDSON, E.A.; ARTAXO, P. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the Large-scale Biosphere–Atmosphere Experiment. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 519-529, 2004.

DOCKERY, D.W.; POPE, C.A. Acute respiratory effects of particulate air pollution. **Annual Review of Public Health**, v. 15, p. 107–132, 1994.

DONALDSON, K.; POLAND, C. A. Inhaled nanoparticles and lung cancer - what we can learn from conventional particle toxicology. **Swiss Medical Wkly**, v. 142, p. 13547, 2012.

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

FREITAS, S.R.; LONGO, K.M.; SILVA DIAS, M.A.F.; ARTAXO, P. Numerical modelling of air mass trajectories from the biomass burning areas of the Amazon basin. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 68, p. 193-206, 1997.

FREITAS, S.R.; SILVA DIAS, M.A.F.; SILVA DIAS, P.L.; LONGO, K.M.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M.O.; FISCHER, H. A convective kinematic trajectory technique for low resolution atmospheric models. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. 19, p. 24.375-24.386, 2000.

GOLUB, A.; STRUKOVA, E. Avaliação e identificação de poluentes atmosféricos prioritários para gestão ambiental com base em análise de risco na Rússia. **Jornal de Toxicologia e Saúde Ambiental**, v.71, n.1, p. 86-91, 2008.

GOMES, M. J. Ambiente e pulmão. **Jornal de Pneumologia**, v. 28, p. 261-269, 2002.

GUENTHER, A.; HEWITT, C.N.; ERICKSON, D.; FALL, R.; GERON, C. A global model of natural volatile organic compound emissions, **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 8873-8892, 1995.

HAJAT, S.; HAINES, A.; ATKINSON, R.W.; BREMNER, S.A.; ANDERSON, H.R. Association between air pollution and daily consultations with general practitioners for allergic rhinitis in London, United Kingdom. **American Journal Epidemiology**, v. 153, n. 7, p. 704-14, 2001.

HAYWOOD, J.; BOUCHER, O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review. **Reviews of Geophysics**, v. 38, n. 4, p. 513-543, 2000.

IGNOTTI, E.; VALENTE, J.G.; LONGO, K.M.; FREITAS, S.R., HACON, S.S.; ARTAXO NETTO, P. Impact on human health of particulate matter emitted from burnings in the Brazilian Amazon region. **Revista de Saúde Pública**, v. 44, n. 1, p. 121-30. 2010.

JACOBSON, L.S.V.; HACON, S.S.; CASTRO, H.A; IGNOTTI, E; ARTAXO, P; SALDIVA, P.H. Acute effects of particulate matter and black carbon from seasonal fires on peak expiratory flow of schoolchildren in the Brazilian Amazon, **Plosone**, v. 9, n. 8, p. 104177, 2014.

KAUFMAN, Y.J.; HOBBS, P.V.; KIRCHHOFF, V.W.J.H.; ARTAXO, P.; REMER, L.A.; HOLBEN, B.N.; KING, M.D.; WARD, D.E.; PRINS, E.M.; LONGO, K.M.; MATTOS, L.F.; NOBRE, C.A.; SPINHINE, J.D.; JI, Q.; THOMPSON, A.M.; GLEASON, J.F.; CHRISTOPHER, S.A.; TSAY, S.C. Smoke, clouds and radiation (SCAR-B) experiment. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres**, v. 103, n. D24, p. 31783-31808, 1998.

KOREN, I.; MARTINS, J.V.; REMER, L.A.; AFARGAN, H. Smoke Invigoration Versus Inhibition of Clouds over the Amazon. **Science**, v. 321, p. 946-949, 2007.

MARTIN, S.T.; ANDREAE, M.O.; ARTAXO, P.; BAUMGARDNER, D.; CHEN, Q.; GOLDSTEIN, A.H.; TREBS, I. Sources and properties of Amazonian aerosol particles. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 2, RG2002, 2010.

MILLER, G.T.; SPOOLMEN, S.E. **Ciência ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, p. 15, 2015.

MOLLER, P.; FOLKMANN, J.K.; FORCHHAMMER, L.; BRÄUNER, E.V.; DANIELSEN, P.H.; RISOM, L.; LOFT, S. Air pollution, oxidative damage to DNA, and carcinogenesis. **Cancer Letters**, v. 266, p. 84–97, 2008.

NASCIMENTO, J.P.; BELA, M.M.; MELLER, B.B.; BANDUCCI, A.L.; RIZZO, L.V.; VARA-VELA, A.L.; BARBOSA, H.M.J.; GOMES, H.; RAFEE, S.A.A.; FRANCO, M.A.; CARBONE, S.; CIRINO, G.G.; SOUZA, R.A.F.; MCKEEN, S.A.; ARTAXO, P. Aerosols from anthropogenic and biogenic sources and their interactions – modeling aerosol formation, optical properties, and impacts over the central Amazon basin. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, p. 6755–6779, 2021.

NELL, A.E; DIAZ-SANCHEZ, D.; HIURA, T., SAXON, A. Enhancement of allergic inflammation by the interaction between diesel exhaust particles and the immune system. **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, v. 102, p. 539-54, 1998.

NEPSTAD, D.C.; MOREIRA, A.; ALENCAR, A.A. **A floresta em chamas: origens, impactos e prevenção de fogo na Amazônia**. Brasília,DF, Brasil, 1999. 202p. (Programa Piloto para a Proteção das Florestas Tropicais do Brasil).

NOBRE, P. Variabilidade interanual do Atlântico tropical e sua influência no clima da América do Sul. **Revista Climanálise – Edição comemorativa de**, v.10, 1996. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a>. Acesso em: 03 de dezembro de 2017.

PENNER, J.E. Aerosols, their direct and indirect effects. *In*: HOUGHTON, J.T. *et al.* (eds.). **Climate change 2001: the scientific basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; New York, NY, USA: United Kingdom, 2001. p. 289–348.

PEREIRA, L.A.A.; ASSUNÇÃO, J.V.; SANTOS, U.P.; BRAGA, A.L.F.; ANDRÉ, P.A.; GÂMDARA, M.; LIN, C.A.; ABRÃO, M.S. Clima e saúde. *In*: SALDIVA, P. **Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles**. São Paulo: Ex Libris, 2010. p. 148-161.

POPE, C.A. Air Pollution and Health: Good News and Bad. **The New England Journal Medicine**, v. 351, n. 11, p. 1132-4, 2004.

POPE, C.A. III; BATES, D.V.; RAIZENNE, M.E. Health Effects of Particulate Air Pollution: Time for Reassessment? **Environ Health Perspect.** v.103, p. 472-480, 1995.

PROCÓPIO, A. S.; ARTAXO, P.; KAUFMAN, Y. J.; REMER, L. A.; SCHAFER, J. S.; HOLBEN, B. N. Multiyear analysis of amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, L03108, 2004.

RAMASWAM, V.; OUCHHER, O.; HAIGH, J., HAUGLUSTAINNE, D.; HAYWOOD, J.; MYHRE, G.; NAKAJIMA, T., SHI, G.Y; SOLOMON, S. Radiative forcing of climate change. *In: HOUGHTON, J.T. et al (eds) Climate change: contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Cambridge; New York, USA: Cambridge University Press, 2001. p. 349-416.

RAMASWAMY, V.; BOUCHER, O.; HAIGH, J.; HAUGLUSTINE, D., HAYWOOD, J.; MYHRE, G.; SOLOMON, S. Radiative forcing of climate. **Climate Change**, v. 349, p. 1-32, 2001.

RAP, A.; SPRACKLEN, D.V.; MERCADO, L.; REDDINGTON, C.L.; HAYWOOD, J. M.; ELLIS, R.J.; PHILLIPS, O.L.; ARTAXO, P.; BONAL, D.; RESTREPO COUPE, N.; BUTT, N. Fires increase Amazon forest productivity through increases in diffuse radiation. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 11, p. 4654-4662, 2015.

RISSLER, J.; SWIETLICKI, E.; ZHOU, J.; GATTI, L.V.; ROBERTS, G.; ANDREAE, M.O.; ARTAXO, P. Physical properties of the submicrometer aerosol over the Amazon rain forest during the wet-to-dry season transition – Comparison of modeled and measured CCN concentrations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 4, p. 2119-2143, 2004.

RIZZO, L.V. **Modelamento de propriedades físicas e químicas de aerossóis e suas interações com gases traços na Amazônia.** 2002. 240f. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2002.

ROCHA, V. R. **Análise de propriedades de nuvens em função da profundidade óptica do aerossol a partir de produtos derivados pelo MODIS da região amazônica durante a estação seca.** 2011. 140f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

ROSA, A.M.; IGNOTTI, E.; BOTELHO, C.; CASTRO, H.A.; HACON, S.S. Doença respiratória e sazonalidade climática em menores de 15 anos em um município da Amazônia Brasileira. **Jornal de Pediatria**, v. 84, n. 6, p. 543-9, 2008.

ROSENFELD, D. Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. **Science**, v. 287, p. 1793-1796, 2000.

SALDIVA, P. **Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles.** São Paulo: Ex-Libris Comunicação Integrada, 2010. 200p.

SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D.W. Particulate air pollution and daily mortality in Steubenville, Ohio. **American Journal Epidemiology**, v. 135, p. 12-19, 1992.

SEINFELD, J.H.; SPYROS, N.P. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change.** [S.l.]: J. Wiley, 2006.

SENA, E.T.; ARTAXO, P.; CORREIA, A.L. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosol and the effects of land use change in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 13, p. 1261-1275, 2013.

SILVA JUNIOR, R.S.; ANDRADE, F.A. Validação de poluentes fotoquímicos e inclusão do inventário de emissões no modelo de qualidade do ar WRF/CHEM, para a região metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p.105-121, 2013.

STONE, V.; WILSON, M.R.; LIGHTBODY, J.; DONALDSON, K. Investigating the potential for interaction between the components of PM 10. **Environmental Health and Preventive Medicine**, v. 7, n. 6, p. 246, 2003.

SILVA DIAS, M.A.F.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M.O. Aerosols impact clouds in the Amazon Basin. **GEWEX Newsletter**, v. 14, n. 4, p. 4-6, 2004.

SILVA DIAS, M.A.F.; RUTLEDGE, S.; KABAT, P.; SILVA DIAS, P.L.; NOBRE, C.; FISCH, G.; DOLMAN, A.J.; ZIPSER, E.; GARSTANG, M.; MANZI, A.; FUENTES, J. D.; ROCHA, H.; MARENGO, J.; PLANA-FATTORI, A.; SÁ, L.; ALVALÁ, R.; ANDREAE, M.O.; ARTAXO, P.; GIELOW, R.; GATTI, L. V. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region, **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 8.072-8.092, 2002.

VAN DONKELAAR, A.; MARTIN, R. V.; BRAUER, M.; KAHN, R.; LEVY, R.; VERDUZCO, C.; VILLENEUVE, P. J. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: Development and application, **Environmental Health Perspectives**, v. 118, p. 847–855, 2010.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air Pollution and Child Health: Prescribing Clean Air**, Geneve, WHO, p. 1-22, 2018.

YAMASOE, M.A.; CORRÊA, M. de Paula. **Processos radiativos na atmosfera**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2016.

YAMASOE, M.A.; VON RANDOW, C.; MANZI, A.O.; SCHAFER, J.S.; ECK, T.F.; HOLBEN, B.N. Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 6, p. 1645-1656, 2006.

ZHOU, J.; SWIETLICKI, E.; HANSSON, H. C.; ARTAXO, P. Submicrometer aerosol particle size distribution and hygroscopic growth measured in the Amazon rain forest during the wet season. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 8055-8065, 2002.