



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**



LUCIANA VIANA VELOSO

**ANÁLISE QUANTITATIVA DO AR NO ESTADO DO MARANHÃO A PARTIR
DO USO DO MODELO HYSPLIT**

**Chapadina – MA
Julho de 2022**

LUCIANA VIANA VELOSO

**ANÁLISE QUANTITATIVA DO AR NO ESTADO DO MARANHÃO A PARTIR
DO USO DO MODELO HYSPLIT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Maranhão, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Profa. Dra. Kamilla Andrade de Oliveira.

**Chapadinha – MA
Julho de 2022**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Viana Veloso, Luciana.

ANÁLISE QUANTITATIVA DO AR NO ESTADO DO MARANHÃO A
PARTIR DO USO DO MODELO HYSPLIT / Luciana Viana Veloso. -
2022.

38 f.

Orientador(a): Kamilla Andrade de Oliveira.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola,
Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha- MA, 2022.

1. Material Particulado. 2. Qualidade do ar. 3.
Queimadas. I. Andrade de Oliveira, Kamilla. II. Título.

LUCIANA VIANA VELOSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

TCC defendido e aprovado, em 28 de julho de 2022, pela comissão examinadora constituída pelos professores:

Profa. Dra. Kamilla Andrade de Oliveira

Orientadora

Prof. Dr. Marcus Willame Lopes Carvalho

Examinador

Maiane Rodrigues do Nascimento

Examinador

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 Queimadas e qualidade do ar	16
3.2 Enquadramento legislativo	17
3.3 Material Particulado.....	18
3.4 Modelo de transporte e dispersão de poluentes	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1 Caracterização da área de estudo	20
4.2 Focos de Calor	21
4.3 SISAM	21
4.4 Trajetória das massas de ar	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1 Análise dos focos de calor	22
5.2 Análise do Material Particulado.....	24
5.3 Trajetórias HYSPLIT	30
6. CONCLUSÕES.....	34
REFERÊNCIAS	35

Ao meu pai, José Costa Veloso (*in memoriam*) que acreditou em mim até o último instante de sua vida, e minha mãe, Maria Flory, a maior incentivadora dos meus sonhos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter me dado forças para chegar até aqui.

A minha mãe, Maria Flory pelo amor, pela preocupação, e pelas orações que me ofertou desde sempre. Sem ela nada disso seria possível.

A minha irmã Nilda, por todo suporte e incentivo.

Ao meu namorado, Bruno pelo apoio e companheirismo e por entender minha ausência em diferentes momentos.

A minha orientadora professora Kamilla Andrade, pela confiança, orientação e paciência.

Aos meus colegas de turma com quem partilhei os últimos 5 anos, em especial a Emanuelle Baêta por todas as palavras de incentivo, principalmente durante a confecção deste trabalho, e aos demais colegas Luanne, Vinicius, Ismael, Edna, Iasmim, Enyo e Luís por todas as lembranças felizes que levarei comigo por qualquer que seja o caminho.

A todos que colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho, o meu mais sincero obrigada!

*“You can’t bribe the door on your way
to the sky”*

(Harry Styles)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização do estado do Maranhão, Brasil.....	20
Figura 2. Número de focos de calor registrados mensalmente no estado do Maranhão, período de 2010-2019.....	24
Figura 3. Variação mensal do MP _{2,5} no estado do Maranhão.	25
Figura 4. Distribuição espacial das médias anuais de MP _{2,5} nos municípios maranhenses.	27
Figura 5. Simulações Hysplit para os anos de 2010 a 2015.	31
Figura 6. Simulações Hysplit para os anos de 2016 a 2019.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Padrões de qualidade do ar adotados no Brasil.	18
Tabela 2. Focos de calor detectados entre 2010 e 2019 no estado do Maranhão.	23
Tabela 3. Médias mensais anuais de MP _{2,5} para o estado do Maranhão, período de 2010 a 2019.	26
Tabela 4. Correlação entre focos de calor e material particulado.....	29

LISTA DE SIGLAS

CAMS - Serviço de Monitoramento da Atmosfera do Copernicus

CO - Monóxido de Carbono

ECMWF - Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo

GDAS - Global Data Assimilation System

HYSPLIT - Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MP – Material Particulado

NOAA - National Oceanic & Atmospheric Administration

NO₂ - Dióxido de Nitrogênio

OMS – Organização Mundial da Saúde

O₃ - Ozônio

PTS - Partículas Totais em Suspensão

SISAM – Sistema de Informações Ambientais Integrado a Saúde

SO₂ - Dióxido de Enxofre

RESUMO

As queimadas são responsáveis pela emissão de inúmeros poluentes que causam a deterioração da qualidade do ar e afetam a saúde humana. Nesse sentido, objetivou-se avaliar o impacto das queimadas na qualidade do ar no estado do Maranhão, através da análise de Material Particulado, no período de 2010 a 2019. Para tal finalidade, foram obtidos dados de focos de calor, que permitiu estimar o período de pico de queimadas para o estado do Maranhão, $MP_{2,5}$ e simulações de massas de ar utilizando o modelo HYSPLIT. O estado do Maranhão registrou 240.235 ocorrências de focos de calor para o período em estudo, com os meses de agosto a outubro apresentando o maior número de ocorrências. As concentrações de $MP_{2,5}$ apresentaram um comportamento sazonal, com o segundo semestre do ano apresentando as maiores médias, as regiões mais atingidas pelas altas concentrações de material particulado foram as regiões central e leste do estado. O modelo HYSPLIT mostrou que as massas de ar que partem da região de Mirador, se deslocam principalmente no sentido oeste, apresentando variação ao longo do seu percurso. Os resultados encontrados mostram que algumas partes do estado necessitam de uma atenção maior em detrimento a outras.

Palavras-chave: Material Particulado; Queimadas; Qualidade do ar.

ABSTRACT

The fires are responsible for the emission of numerous pollutants that cause the deterioration of air quality and affect human health. In this sense, the objective was to evaluate the impact of fires on air quality in the state of Maranhão, through the analysis of Particulate Matter, in the period from 2010 to 2019. For this purpose, data were obtained from hot spots, which allowed estimating the peak period of fires for the state of Maranhão, $MP_{2.5}$ and air mass simulations using the HYSPLIT model. The state of Maranhão registered 240,235 occurrences of fires for the period under study, with the months of August through October showing the highest number of occurrences. The concentrations of $MP_{2.5}$ showed a seasonal behavior, with the second half of the year presenting the highest averages, the regions most affected by the high concentrations of particulate matter were the central and eastern regions of the state. The HYSPLIT model showed that the air masses departing from the Mirador region, move mainly in a westerly direction, presenting variation along their path. The results show that some parts of the state need more attention than others.

Keywords: Particulate Matter; Burning; Air Quality.

1. INTRODUÇÃO

As queimadas caracterizam-se como uma prática antiga e no Nordeste do Brasil, aparecem com maior frequência durante o período de estiagem e estão ligadas principalmente a atividades como limpeza e preparo de terras agrícolas. Mendonza (2002) explica que períodos com baixa pluviosidade combinados com a baixa umidade do ar favorecem o processo de espalhamento do fogo.

Nas últimas décadas o Maranhão tem registrado altos números de focos de calor, em 2019 o estado ocupou a 3º posição do ranking de estados com maior número de focos de queimadas com quase 10% de todos os focos registrados no território nacional (INPE, 2022). Além de modificações na paisagem, as queimadas e incêndios florestais também estão relacionados a problemas na saúde humana devido a grande quantidade de poluentes que são emitidos durante o processo de queima, entre eles os óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e material particulado (MP), sendo este último, um poluente que apresenta alto grau de toxicidade sendo extremamente prejudicial à saúde humana (RIBEIRO & ASSUNÇÃO, 2002; ARBEX et al., 2004).

Observando os impactos das queimadas da região Centro-Oeste do Brasil sobre as cidades do estado de São Paulo, Sarra et al (2021) constataram um aumento nas concentrações de particulados MP_{2,5} e MP₁₀ e Tolueno nas cidades do estado de São Paulo e conseqüentemente verificou-se um crescimento nas internações hospitalares por problemas respiratórios nesses locais. Moreira et al. (2014) ao estudarem as concentrações de material particulado na região de Tangará da Serra – MT, observou que o período de alta concentração de poluentes coincidiu com o período de maior incidência de queimadas na Amazônia, havendo uma relação entre as duas variáveis.

Para Santiago et al. (2015) o MP emitido durante as queimadas possui dimensão e densidade menores, prolongando sua permanência no ar e causando cortinas de fumaça. Dessa forma, dependendo das condições meteorológicas do ponto de queima, a fumaça e outros poluentes podem ser transportados de um local para outro, afetando a qualidade do ar em locais próximos ou regiões mais remotas.

Para entender esse processo, muitos estudos têm recorrido ao *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT), modelo de transporte e dispersão atmosférica utilizado nos processos de simulação e transporte de poluentes e determinação da origem de massas de ar. O HYSPLIT assim como outros modelos de dispersão, auxilia no entendimento do processo de dispersão de partículas emitidas

durante episódios de queima e que possam causar impactos em escala local, regional e global.

Apesar de muitos estudos já terem demonstrado o impacto das queimadas na qualidade do ar em diversos estados e municípios brasileiros, no estado do Maranhão devido à escassez de dados e informações o tema ainda é pouco explorado. Na ausência de metodologias desenvolvidas e implementadas, faz-se necessário recorrer a fontes alternativas que permitam avaliar se as concentrações de poluentes no estado estão em conformidade com a legislação ambiental do país, visando assim, o auxílio na tomada de decisões.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto das queimadas na qualidade do ar do estado do Maranhão, através da análise de Material Particulado (MP_{2,5}) durante um período de 2010 a 2019.

2.2 Objetivos específicos

- Quantificar as queimadas no estado do Maranhão;
- Identificar a trajetória dos poluentes e as possíveis áreas de acúmulo utilizando o modelo Hysplit.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Queimadas e qualidade do ar

As queimadas configuram-se como um processo de queima de biomassa que pode ocorrer de forma natural ou por meio de atividades antrópicas, e são uma das principais fontes de emissão de aerossóis e gases traços para a atmosfera (FREITAS et al., 2005; VAN DER WERF et al., 2017).

O monitoramento da qualidade do ar é fundamental no processo de gestão ambiental, pois auxilia na identificação de fontes poluidoras e permite um melhor gerenciamento de regiões drasticamente afetadas por poluentes.

No Brasil, é responsabilidade dos estados realizar o monitoramento da qualidade do ar. No entanto, um estudo realizado por Vormittag et al. (2021) revelou que apenas 10 estados brasileiros e o Distrito Federal realizam esse monitoramento através de estações ativas, sendo Pernambuco, o único estado da região nordeste presente nessa lista. A melhor cobertura de estações está na região sudeste, que abriga 298 estações de monitoramento do ar de um total de 430 estações existentes no país. O estudo revelou

ainda que alguns estados não realizam esse monitoramento devido aos custos financeiros e outros por acreditarem que não são poluídos.

Considerando as limitações acerca da obtenção de dados “*in situ*” que permitam estimar a qualidade do ar para uma determinada região, o INPE em parceria com outras instituições desenvolveram o Sistema de Informações Ambientais integrado à Saúde Ambiental (SISAM) para a obtenção de variáveis ambientais. A plataforma tem como fonte os modelos do Serviço de Monitoramento da Atmosfera do Copernicus (CAM5) do Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo (ECMWF) e fornece dados de concentrações de poluentes baseados em imagens de satélite e análises numéricas (SISAM, 2022).

3.2 Enquadramento legislativo

Os padrões de qualidade do ar definem legalmente o limite máximo para a concentração de um poluente na atmosfera. No Brasil, o órgão responsável pela regulamentação dos padrões da qualidade do ar é o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2022). A Resolução CONAMA nº 491/2018 considera como poluente atmosférico “qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade”.

A Resolução estabelece duas categorias para os padrões de qualidade do ar. A primeira categoria está relacionada aos padrões de qualidade do ar intermediários (PI), onde estão dispostos valores temporários a serem cumpridos em três etapas, chamadas de: PI-1, PI-2 e PI-3. A segunda categoria definida pela resolução refere-se ao padrão de qualidade do ar final (PF) e representa valores definidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2005. Embora o padrão PI-1 tenha iniciado em 2018, até a data de realização deste estudo as demais fases ainda não possuíam data para serem implantadas.

A resolução destaca que os principais poluentes atmosféricos que servem como referência para estimar a qualidade do ar, são: Material Particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}); Dióxido de Enxofre - SO₂; Dióxido de Nitrogênio - NO₂; Ozônio - O₃; Monóxido de Carbono - CO; Partículas Totais em Suspensão - PTS. No Quadro 1 são apresentados os padrões nacionais de qualidade do ar para o Brasil, conforme a Resolução CONAMA nº 491/2018.

Tabela 1. Padrões de qualidade do ar adotados no Brasil.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		mg/m ³	m/m ³	mg/m ³	mg/m ³	ppm
Material Particulado - MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora ²	260	240	220	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	-
Ozônio - O ₃	8 horas ³	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
Chumbo – Pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	0,5	-

1 Média aritmética anual

2 Média horária

3 Máxima média móvel obtida no dia

4 Média geométrica anual

5 Medido nas partículas totais em suspensão

Fonte: Resolução CONAMA nº 491/2018

3.3 Material Particulado

O material particulado atmosférico corresponde a uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas, que pode se apresentar no estado sólido ou líquido e variar quanto a sua origem, composição e tamanho (WHO, 2003).

As fontes de emissão de material particulado podem ser naturais, caso das erupções vulcânicas e ventos de solos desérticos, ou antropogênicas a partir de atividades industriais, queimadas e combustíveis fósseis (SANTIAGO, 2013). O material particulado pode também se formar na atmosfera a partir de gases como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs), que são emitidos principalmente em atividades de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar (CETESB, 2022).

O MP pode ser dividido em duas categorias. O material particulado fino, formado por partículas cujo tamanho chega até 2,5 micrômetros e o material particulado grosso, com partículas de tamanho entre 2,5 e 10 micrômetros, de modo que, quanto menor a partícula maior são os efeitos na saúde humana (CETESB, 2022). Na literatura, muitos estudos associaram o material particulado, principalmente o MP_{2,5}, a problemas como mortes prematuras, doenças respiratórias e cardiovasculares (MATZ et al., 2020; MASCARENHAS et al., 2008; RODRIGUES, 2016).

Embora seja um poluente de alto risco para a saúde humana, apenas em 2018 foi regulamentada a primeira legislação que definiu os limites para as emissões de MP_{2,5} no Brasil. A Resolução CONAMA nº 491/2018, já supracitada, definiu em seu padrão intermediário 1 (PI-1) valores de 60 µg/m³ para um período de 24 horas e de 20 µg m³ para a concentração média anual desse poluente.

3.4 Modelo de transporte e dispersão de poluentes

Os modelos de dispersão e transporte atmosférico configuram-se como importantes ferramentas no processo de análise e previsão do movimento de massas de ar, bem como materiais perigosos presentes na atmosfera, estes permitem descrever os processos complexos que regem um determinado fenômeno, mostrando através de simulações possíveis regiões de impacto (NGAN et al., 2018).

Dentro da comunidade acadêmica, existem diversos modelos de dispersão que são amplamente utilizados para análise do transporte atmosférico e dispersão de poluentes, entre eles: *Atmospheric Dispersion Modelling System* (ADMS), *Californian Puff Model* (CALPUFF) e o *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model* (HYSPLIT). O HYSPLIT se destaca entre os demais pela sua eficiência e facilidade de uso.

O modelo usa um método de cálculo híbrido, entre as abordagens Lagrangiana utilizada para calcular a advecção e difusão de parcela de ar e a abordagem Euleriana utilizada no cálculo das concentrações de poluentes no ar (STEIN et al., 2015).

No modelo estão disponíveis dois tipos de trajetórias. Trajetória reversa (*backward*) que fornece uma estimativa sobre o caminho que o ar seguiu antes de atingir o local receptor, e as trajetórias progressivas (*forward*) que fornecem os caminhos percorridos pelo ar a partir da localização de uma fonte emissora, podendo assim definir quais regiões estão sendo atingidas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado no Estado do Maranhão, localizado na região Nordeste do Brasil entre os paralelos 1°01' e 10°21' Sul e os meridianos 41°48' e 48°50' Oeste, fazendo fronteira com os estados do Pará, Piauí e Tocantins. Apresenta uma extensão territorial de aproximadamente 329.651,495 km², possui 217 municípios incluindo a sua capital, São Luís, os quais estão agrupados em cinco mesorregiões e possui uma população estimada em 7.153.262 habitantes (IBGE, 2020).

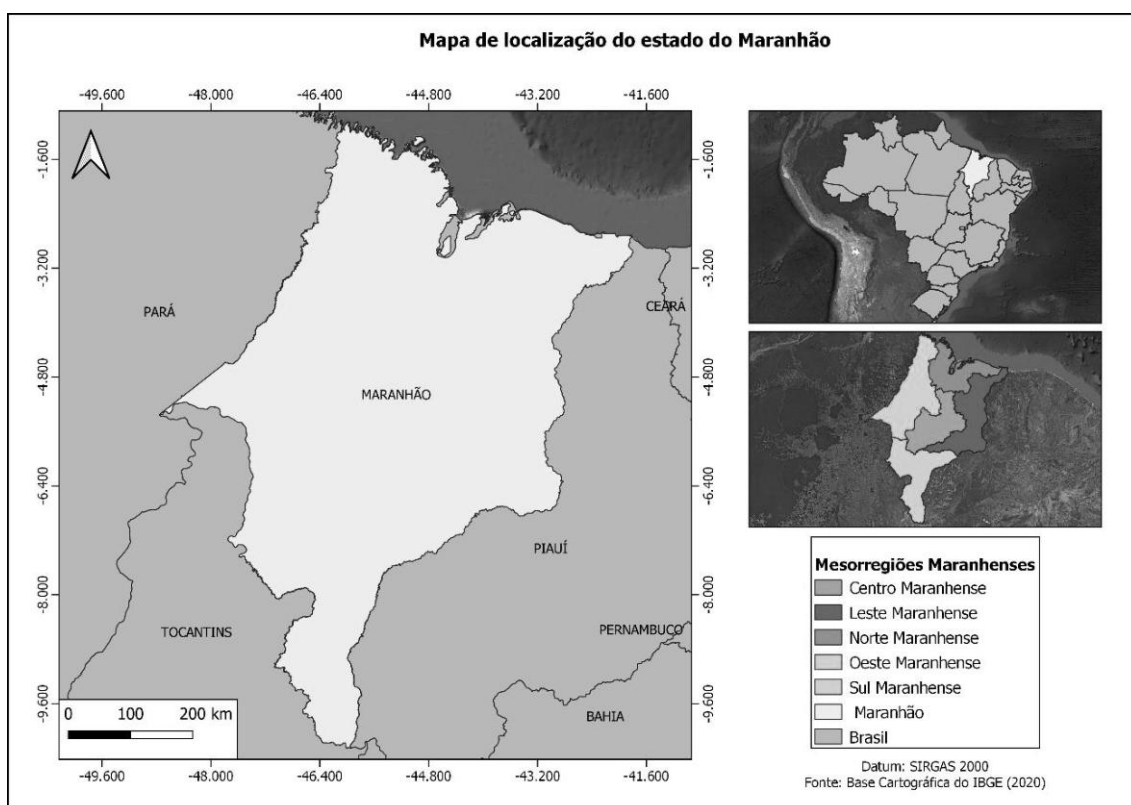


Figura 1. Mapa de localização do estado do Maranhão, Brasil.

Segundo Batistella et al. (2013, p. 100) o estado é dividido entre os biomas Amazônia (34,8%), Caatinga (1,1%) e Cerrado (64,1%). Havendo predomínio da floresta amazônica no setor noroeste, cerrado na região sul, vegetação de restinga e manguezais na região norte (MENEZES, 2009). De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o Maranhão apresenta clima do tipo AW', tropical com chuvas de verão (NASCIMENTO et al., 2017).

O estado apresenta temperaturas médias anuais que oscilam entre 17,5 °C a 29,5 °C e uma estação chuvosa que varia de uma região para outra. Na parte sul as chuvas concentram-se entre os meses de dezembro a fevereiro, na parte central de janeiro a

março, na parte norte de fevereiro a abril e de março a maio na planície costeira (BATISTELLA, 2013).

4.2 Focos de Calor

Os dados de focos de calor foram obtidos por meio de *download* de arquivos vetoriais no formato *Shapefile* no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e foram utilizados para definir os meses de pico de queimadas no estado do Maranhão. A série histórica de dados para este estudo compreende o período de janeiro de 2010 a dezembro de 2019, e foram utilizados dados detectados pelo sensor Espectro Radiômetro Imageador de Resolução Moderada (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS*), a bordo do satélite AQUA M-T.

Após a aquisição dos dados, recorreu-se ao *software* ArcMap (versão 10.3) para a análise dos dados, adotando-se os procedimentos metodológicos propostos por Albuquerque (2017): 1) Reprojecção dos dados ao sistema UTM / SIRGAS 2000; 2) Criação de um banco de dados geográficos com geometria pontual no formato *shapefile*; 3) Tabulação dos dados; 4) Quantificação anual e mensal dos registros.

4.3 SISAM

Considerando a inexistência de uma rede de monitoramento da qualidade do ar no estado do Maranhão, os dados referentes às concentrações de Material Particulado (MP_{2,5}) foram obtidos através de *download* de arquivos no formato *.csv* no site do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM/INPE), os dados serviram para demonstrar o impacto das queimadas sobre a qualidade do ar na área de estudo.

Para análise dos dados foi utilizado o programa Excel®, e adotou-se o cálculo de média aritmética mensal e anual para o estado, considerando todos os registros disponíveis de 1 de janeiro a 31 de dezembro de cada ano. Para os anos de 2010 a 2017 o SISAM disponibiliza dados com intervalos de 6 horas, enquanto nos anos de 2018 e 2019 o intervalo é de 12 horas, com início às 00:00 horas para todos os anos em estudo. As médias anuais para cada município também foram calculadas para verificar quantos municípios ultrapassaram o valor médio anual de 20 µg/m³, que é máximo permitido de acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na sua Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018.

O cálculo da correlação de Pearson foi realizado entre os dados de focos de calor e MP_{2,5}, através da função “correl” no Excel. O coeficiente de Pearson (r) pode variar de -1 a +1, e indica o grau de correlação entre duas variáveis, valores próximos de 1 indica uma associação positiva forte entre duas variáveis, enquanto que valores próximos a -1 indica uma associação negativa entre as variáveis. Quando o valor do coeficiente é igual zero, significa a ausência de correlação. Neste estudo, foram adotados os seguintes valores para a classificação da correlação de Pearson: bem fraca ($0 \leq r < 0,19$), fraca ($0,20 \leq r < 0,39$), moderada ($0,40 \leq r < 0,69$), Forte ($0,70 \leq r < 0,89$) e bem forte ($0,90 \leq r < 1,00$) (ANDRIOTTI, 2003)

4.4 Trajetória das massas de ar

Para calcular as trajetórias das massas de ar que partem da região dos focos foi utilizado o modelo *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) (DRAXLER; HESS, 1998; STEIN et al., 2015). O modelo desenvolvido pela *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) em parceria com *Australian Bureau of Meteorology* foi executado online através do sistema READY na web¹.

Para realizar a modelagem foi necessário informar as coordenadas da área para a qual se deseja realizar a trajetória, neste caso, as coordenadas escolhidas correspondem ao município de Mirador (6.01 S; 44.47 W), a escolha do município justifica-se pelo fato deste está situado em uma região que apresenta grande densidade anual de focos de calor.

Os dados atmosféricos utilizados para a execução do modelo, foram o *Global Data Assimilation System* (GDAS), e uma trajetória progressiva (*forward*) com tempo de duração fixado em 24 horas, com início às 18:00 UTC. A altura selecionada foi de 50 metros acima do nível do solo (AGL), segundo Shaik et al (2019) os aerossóis são mais abundantes abaixo de 1 km.

As datas das simulações para cada ano foram definidas com base na metodologia proposta por Imbuzeiro (2003) a qual evidenciou como o mês de setembro, correspondente ao período de grande incidência de focos de calor no estado, e também adotado na presente pesquisa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos focos de calor

¹ https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php

Após o tratamento e interpretação dos dados constatou-se um total de 240.235 ocorrências de focos de calor entre janeiro de 2010 a dezembro de 2019 no estado do Maranhão. Na tabela 1 são apresentados os quantitativos mensais e anuais dos dados, verifica-se que o ano de 2010 apresentou o maior índice de focos, seguido dos anos de 2012, 2015 e 2017 e juntos somaram 124.588 focos, equivalente a 51% das ocorrências registradas para todo o período em estudo. Por outro lado, os anos de 2018 e 2013 foram os anos que apresentaram menor índice de ocorrências com 13.892 e 17.455 focos respectivamente.

Tabela 2. Focos de calor detectados entre 2010 e 2019 no estado do Maranhão.

Mês/Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Janeiro	457	195	461	316	291	458	395	178	281	712
Fevereiro	104	14	84	72	17	78	268	44	15	74
Março	129	43	54	45	40	41	70	32	93	57
Abril	143	46	114	83	66	103	103	90	50	63
Maió	300	98	370	132	140	184	186	157	203	139
Junho	1225	689	987	603	786	850	693	644	738	749
Julho	2601	1159	3693	1332	2027	1616	2182	1973	1457	1078
Agosto	6826	2192	10519	2374	5338	5411	3849	3001	2833	3366
Setembro	11813	5086	7376	4312	4357	5502	3109	9243	3177	3667
Outubro	4095	3171	5911	3221	5574	6387	5617	4538	1832	3645
Novembro	6082	4038	2644	2368	3710	4159	3826	2706	2309	3158
Dezembro	2502	2584	2086	2597	2329	3647	1491	2970	904	1813
Total	36277	19315	34299	17455	24675	28436	21789	25576	13892	18521

Ao considerar a variação mensal, verifica-se um aumento expressivo nos registros de focos a partir do segundo semestre do ano, havendo maior concentração principalmente nos meses de agosto, setembro e outubro. Nos meses de novembro e dezembro ainda há um número alto de ocorrências, porém nota-se uma pequena redução em relação aos três meses anteriores (Figura 2). Considerando os três meses de pico de focos de calor, ao longo de 10 anos, o mês de setembro acumulou a maior quantidade de focos, com 57.642 registros.

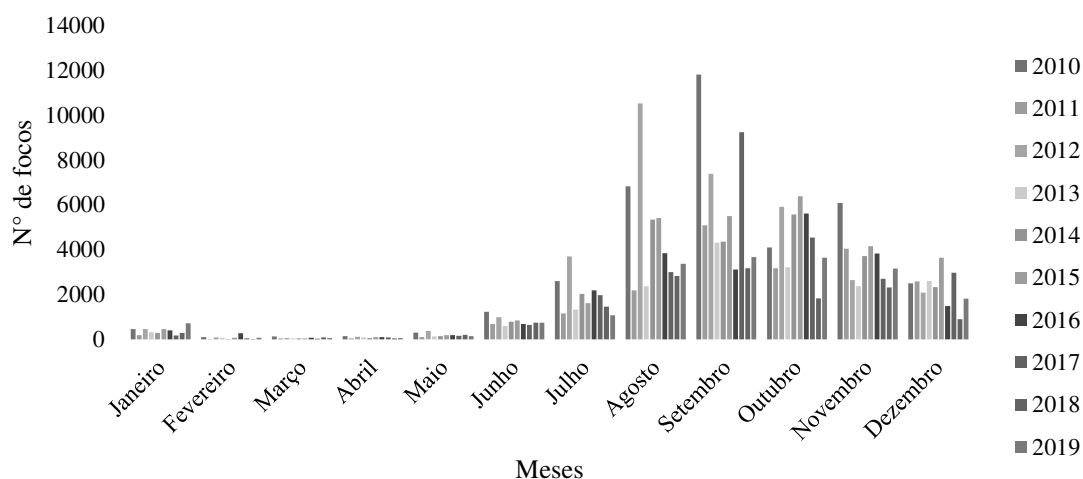


Figura 2. Número de focos de calor registrados mensalmente no estado do Maranhão, período de 2010-2019.

No Maranhão, o primeiro semestre do ano detém alta pluviosidade e temperaturas mais amenas, enquanto o segundo semestre é marcado por um período de estiagem com temperaturas elevadas, características que favorecem a ocorrências de queimadas e propagação do fogo nesse período.

Esses resultados corroboram com os trabalhos de Cordeiro et al. (2022) para o município Marabá no estado do Pará, e Ribeiro e Albuquerque (2020) para o estado do Piauí, em ambos os estudos os autores identificaram o segundo semestre do ano como período de maior incidência de focos de calor, com os meses de agosto a outubro apresentando os maiores registros.

5.2 Análise do Material Particulado

O $MP_{2,5}$ foi utilizado como métrica para avaliar o nível de poluição do ar no estado do Maranhão. Na Figura 6 é apresentado as médias mensais para cada ano em estudo.

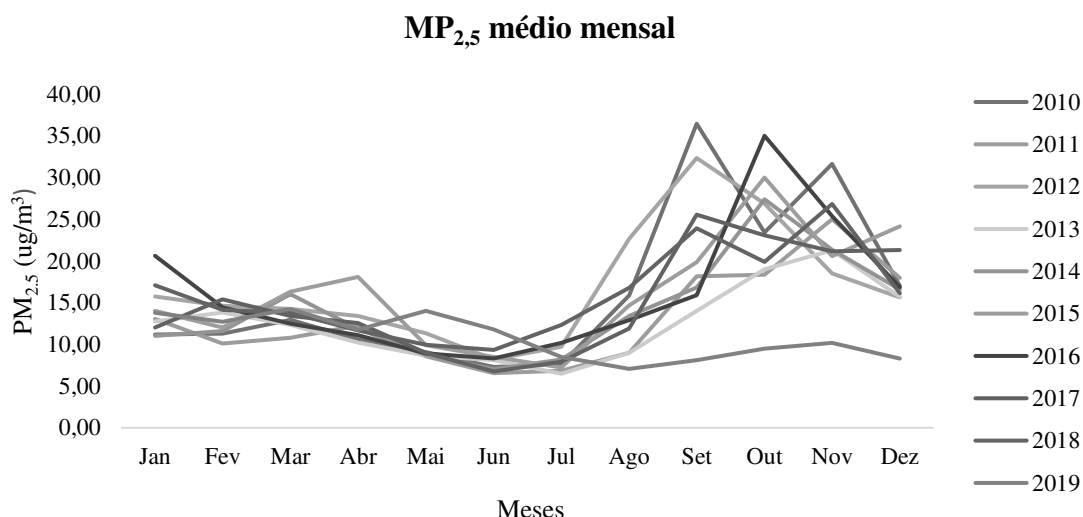


Figura 3. Variação mensal do MP_{2,5} no estado do Maranhão.

Com a análise dos resultados apresentados demonstra-se que as maiores concentrações de material particulado foram observadas no segundo semestre do ano, apresentando aumento a partir do mês de agosto e se mantendo até 40 MP_{2,5} até novembro, no mês de dezembro já é possível observar um decréscimo na média mensal. Esse resultado é similar ao que foi observado anteriormente em relação aos focos de calor, logo, essa análise inicial demonstrou que a alta nas emissões de MP_{2,5} no segundo semestre foram influenciadas pelo alto índice de queimadas nessa época do ano.

O decréscimo nas médias mensais no primeiro semestre foi influenciado pelo aumento da precipitação nessa época do ano. Guerra e Miranda (2011) explicam que as chuvas promovem a remoção dos poluentes da atmosfera, de modo que quanto maior é o volume precipitado, menor é a quantidade de poluentes presentes na atmosfera. Ademais, o solo úmido evita a ressuspensão das partículas na atmosfera (FREITAS e SOLCI, 2009).

Mataveli et al. (2018) ao estimarem as concentrações mensais e anuais MP_{2,5} no Cerrado também observaram que as maiores médias desse poluente se concentram entre os meses de agosto a outubro, estando isso ligado principalmente ao período de estiagem local que favorece o processo de queima.

O gráfico evidenciou ainda um comportamento diferente nas concentrações de MP no ano de 2019, no primeiro semestre as médias anuais de MP apresentaram valores similares aos que foram encontrados nos demais anos, entretanto, no segundo semestre nota-se um comportamento distinto quando comparado com o mesmo período dos anos anteriores. As médias mensais de MP, apresentaram uma brusca redução, com valores inferiores aos que foram obtidos de janeiro a junho. O trimestre de agosto a outubro,

considerado o período crítico de queimadas no Maranhão, registrou as menores médias de MP com valores entre 7,06 e 9,47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 2).

Tabela 3. Médias mensais anuais de MP_{2,5} para o estado do Maranhão, período de 2010 a 2019.

Mês/Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Janeiro	11,17	13,07	15,75	12,76	11,04	14	20,61	12	17,09	13,79
Fevereiro	11,28	10,12	14,64	13,84	11,60	12,02	14,42	15,38	14,13	12,69
Março	12,94	10,80	14,23	12,33	16,00	16,33	12,48	13,39	13,77	14,24
Abril	10,59	12,23	13,41	10,20	11,85	18,09	11,08	12,55	11,69	11,74
Maió	9,06	8,57	11,34	8,63	8,74	9,90	8,89	8,98	9,96	14,00
Junho	7,29	6,55	8,21	8,12	7,03	8,48	8,31	6,75	9,33	11,80
Julho	7,62	6,82	9,72	6,48	8,18	7,23	10,16	7,90	12,32	8,48
Agosto	15,84	9,00	22,65	8,98	13,41	14,66	12,91	11,91	16,78	7,06
Setembro	36,46	18,18	32,35	14,02	16,83	19,86	15,91	25,55	23,93	8,11
Outubro	23,42	18,35	26,88	18,99	27,39	30,00	35,01	23,06	19,88	9,47
Novembro	31,62	25,00	18,49	21,29	21,36	20,58	25,39	21,16	26,83	10,18
Dezembro	17,00	17,98	15,63	15,70	16,58	24,15	16,86	21,31	16,12	8,29
Total	16,19	13,08	16,94	12,61	14,19	16,31	16,06	14,97	15,99	10,81

Sousa et al (2020) ao estudar os impactos das queimadas e desmatamento na Amazônia Legal sobre a qualidade do ar e a saúde humana, concluiu que a baixa relação entre focos de queimadas e MP_{2,5} em 2019 está associada ao “dia do fogo”, episódio que provocou um aumento expressivo no número de focos de calor no dia 10 de agosto de 2019 no estado do Pará e culminou em ações de fiscalização e proibição do uso do fogo durante 60 dias no território brasileiro (Decreto 9.992/19, de 28 de agosto), essas ações podem ter contribuído significativamente para um decréscimo nas ocorrências de queimadas de grande porte e conseqüentemente propiciou uma redução nas emissões de MP_{2,5} pela queima de vegetação.

De acordo com Resolução CONAMA nº 491/2018 as concentrações anuais de MP_{2,5} não devem ultrapassar 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, na Figura 4 é apresentada a distribuição espacial das médias anuais de MP_{2,5} nos municípios maranhenses.

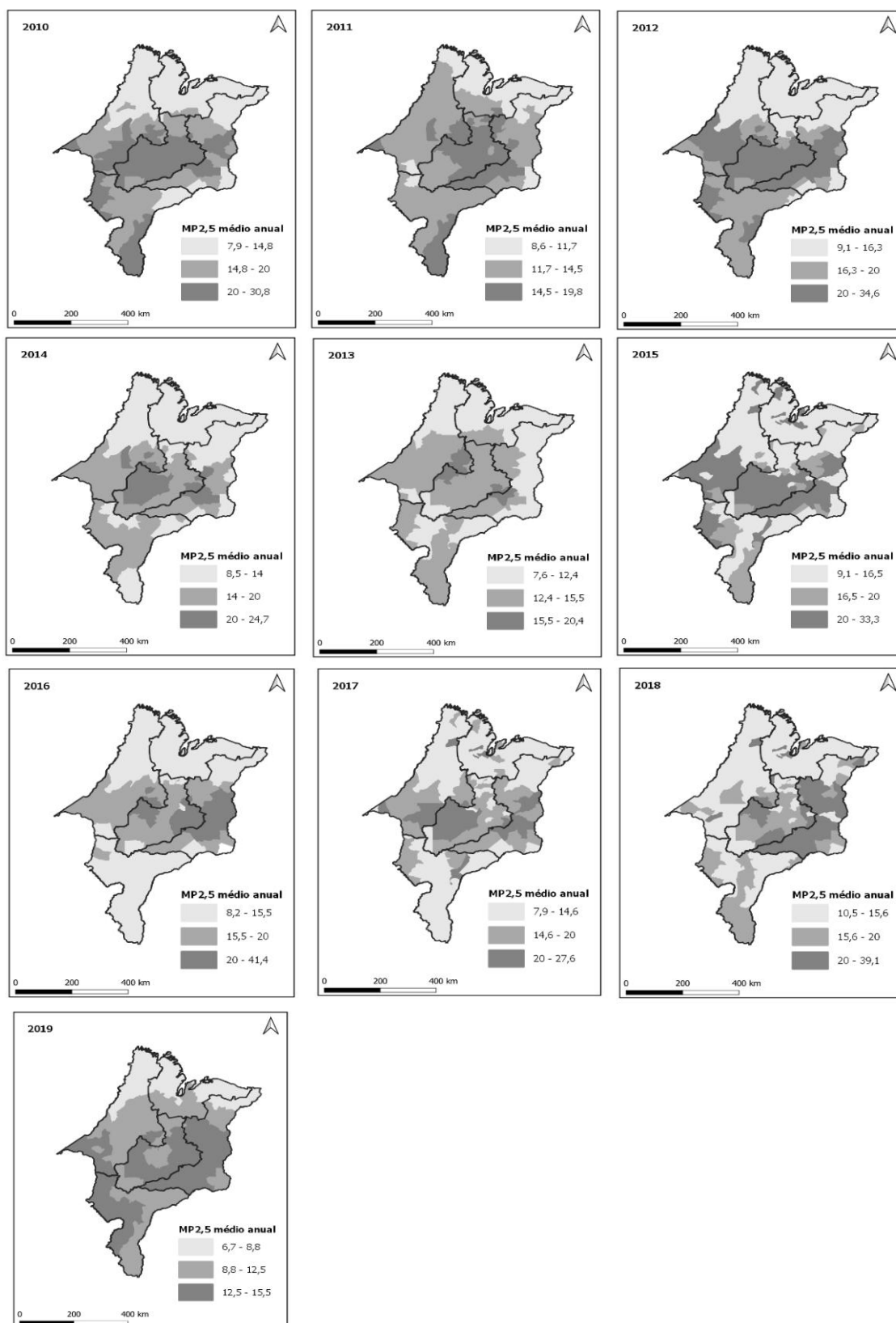


Figura 4. Distribuição espacial das médias anuais de MP_{2,5} nos municípios maranhenses.

Entre os anos de 2010 e 2011, houve uma diferença significativa entre número de municípios que apresentaram concentrações de $MP_{2,5}$ acima dos limites adotados pela legislação brasileira, isto é, $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No total, foram identificados 52 municípios com valores superiores à média prevista pela resolução CONAMA no ano de 2010, concentrados principalmente na parte central do estado, enquanto em 2011 nenhum município ultrapassou o valor limite de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, apresentando médias anuais entre $8,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $19,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Essa variação pode ser explicada pela redução no número de focos de queimadas de um ano para outro, uma vez que, no ano de 2010 foi observado quase o dobro do número de focos registrados em 2011.

Os anos de 2012 e 2013 apresentaram um comportamento similar aos seus antecessores, havendo um aumento no número de locais impactados pelas altas médias anuais de $MP_{2,5}$ em 2012 e uma redução significativa nesse número no ano seguinte, também em razão do decréscimo no número de queimadas. Em 2012 foram identificados 49 municípios com concentrações consideradas altas, distribuídos em sua maioria entre as regiões central, leste e oeste do estado. Um ponto a se destacar no ano de 2013, é que apesar de ter sido identificado 2 municípios que ultrapassaram o limite médio anual de $MP_{2,5}$ de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, os valores registrados não se distanciaram muito do valor ideal, ficando entre $20,1$ e $20,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Entre 2014 e 2015 o número de municípios marcados por altas concentrações de $MP_{2,5}$ totalizaram 69, sendo 19 em 2014 e 50 em 2015. É possível observar que nesses dois anos a região central do estado abrigou novamente grande parte dos municípios com altas médias de material particulado, todavia, em 2015 as regiões leste e oeste também apresentaram uma parcela considerável de municípios atingidos por essas altas concentrações. De acordo com IBAMA (2015), em 2015 Maranhão esteve marcado por intensos episódios de incêndios, principalmente em terras indígenas. Entre as regiões oeste e centro maranhense a Terra Indígena Araribóia foi a mais afetada, com um incêndio que durou cerca de 45 dias e resultou em uma área queimada de aproximadamente 220 mil hectares. Veneros et al. (2021) afirma que, dependendo das condições meteorológicas, a fumaça oriunda das queimadas pode ser transportada em larga escala, afetando a qualidade do ar de pequenas e grandes cidades localizadas a sotavento dos focos de queima.

Em 2016 o número de municípios que ultrapassaram o limite anual de MP voltou a subir, 31 no total. Com destaque para o município de São João do Soter, situado na mesorregião leste do estado, apresentou uma média anual igual a $41,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mais que o

dobro previsto na legislação. Dados do INPE mostram que o município registrou apenas 72 focos de calor durante todo o ano de 2016, porém encontra-se situado em uma região que apresenta alta densidade anual de queima, possivelmente as queimadas nos municípios vizinhos influenciaram na qualidade do ar do município de São João do Soter.

Em 2017, o estado apresentou 23 municípios com concentrações anuais de material particulado acima da média. Os municípios estiveram divididos principalmente entre as regiões leste, central e oeste do estado e a média variou entre 7,9 e 27,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

No ano de 2018, apesar da redução no número de focos de queimadas, 37 municípios ultrapassaram o limite anual de $\text{MP}_{2,5}$, a maior parte concentrados na região leste do estado. Além do alto do número de queimadas nessa região e das fontes fixas de poluição em cada município, outro fator que pode ter contribuído para a deterioração da qualidade do ar nos municípios da região leste, é a dispersão de poluentes oriundos de queimadas, advindo através dos ventos do estado do Piauí. O estado do Piauí faz fronteira com o estado do Maranhão e anualmente registra um alto número de queimadas (RIBEIRO & ALBUQUERQUE, 2020)

Em 2019, nenhum município maranhense excedeu os níveis aceitáveis de poluição do ar para o $\text{MP}_{2,5}$, as médias anuais de cada município ficaram entre 6,5 e 15,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, apresentando o melhor resultado dentre os 10 anos em estudo.

A Tabela 3 apresenta o resultado da correlação entre os dados de focos de calor e material particulado para o estado do Maranhão.

Tabela 4. Correlação entre focos de calor e material particulado.

Ano	Correlação
2010	0,850
2011	0,748
2012	0,729
2013	0,483
2014	0,668
2015	0,668
2016	0,704
2017	0,741
2018	0,713
2019	-0,780

Os anos estudados em sua maioria apresentaram uma correlação positiva entre os registros mensais de focos de calor e a média mensal de $\text{MP}_{2,5}$, variando de moderada a forte. Os anos de 2013, 2014 e 2015 apresentaram uma correlação positiva moderada

($0,40 \leq r < 0,69$), enquanto os demais anos, com exceção de 2019, apresentaram uma correlação positiva forte ($0,70 \leq r < 0,89$) indicando que à medida que o número de focos de calor no estado aumenta, os valores de material particulado tendem a subir também devido a queima de biomassa.

O ano de 2019 apresentou uma correlação negativa forte com valor de -0,78, indicando que as duas variáveis estudadas estão inversamente relacionadas. Esse resultado já era esperado, pois como já supracitado, no ano de 2019 foi identificado uma situação atípica em relação aos outros anos, com o primeiro semestre do ano registrando médias de $MP_{2,5}$ maiores que o segundo semestre.

5.3 Trajetórias HYSPLIT

Nas figuras 5 e 6 são mostradas as trajetórias das massas de ar calculadas utilizando o modelo HYSPLIT. As trajetórias foram calculadas para vários dias, mas para fins didáticos as trajetórias dispostas no trabalho foram escolhidas com base nas semanas que apresentaram maior quantidade de focos de calor durante o mês de setembro de cada ano.

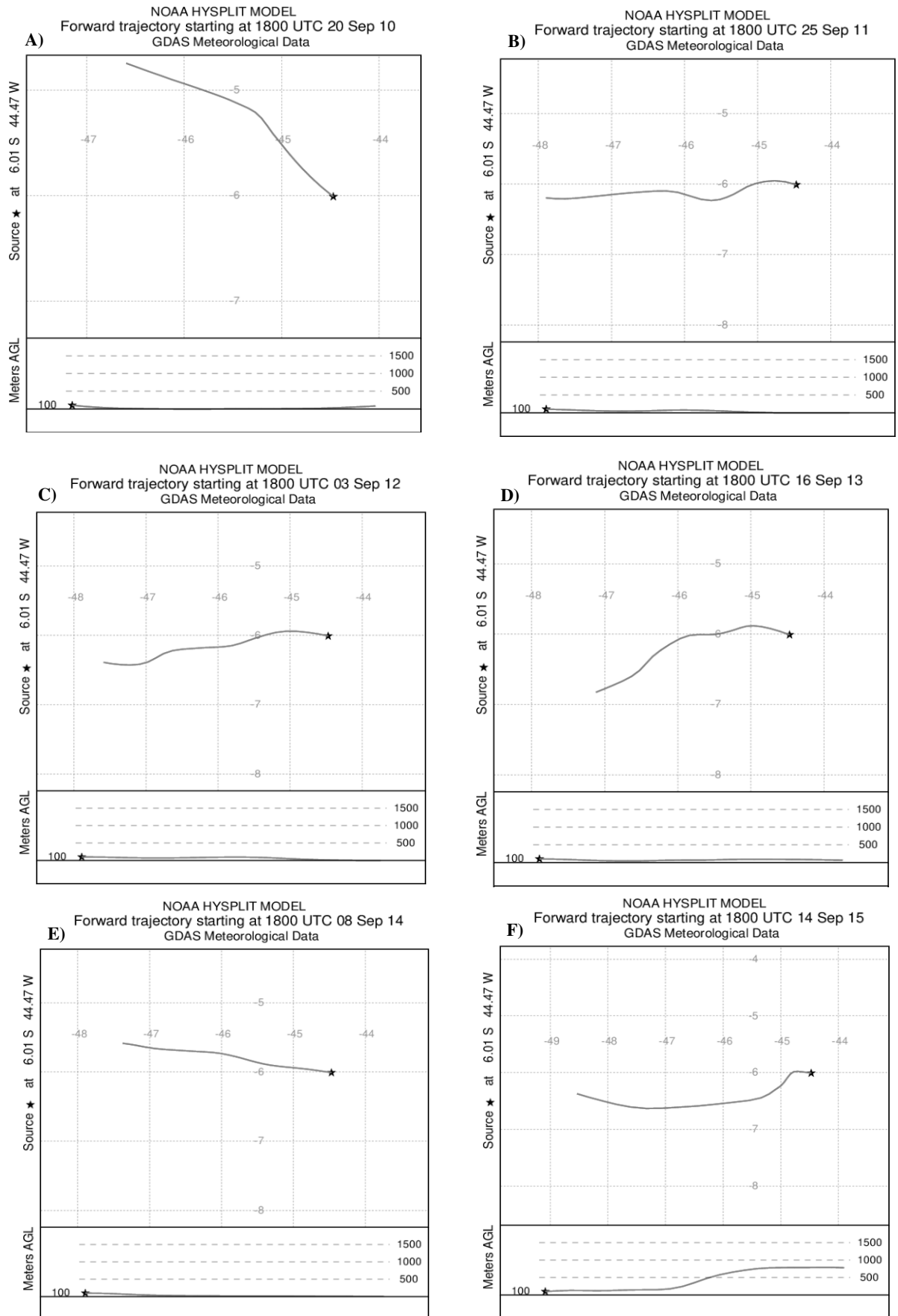


Figura 5. Simulações Hysplit para os anos de 2010 a 2015.

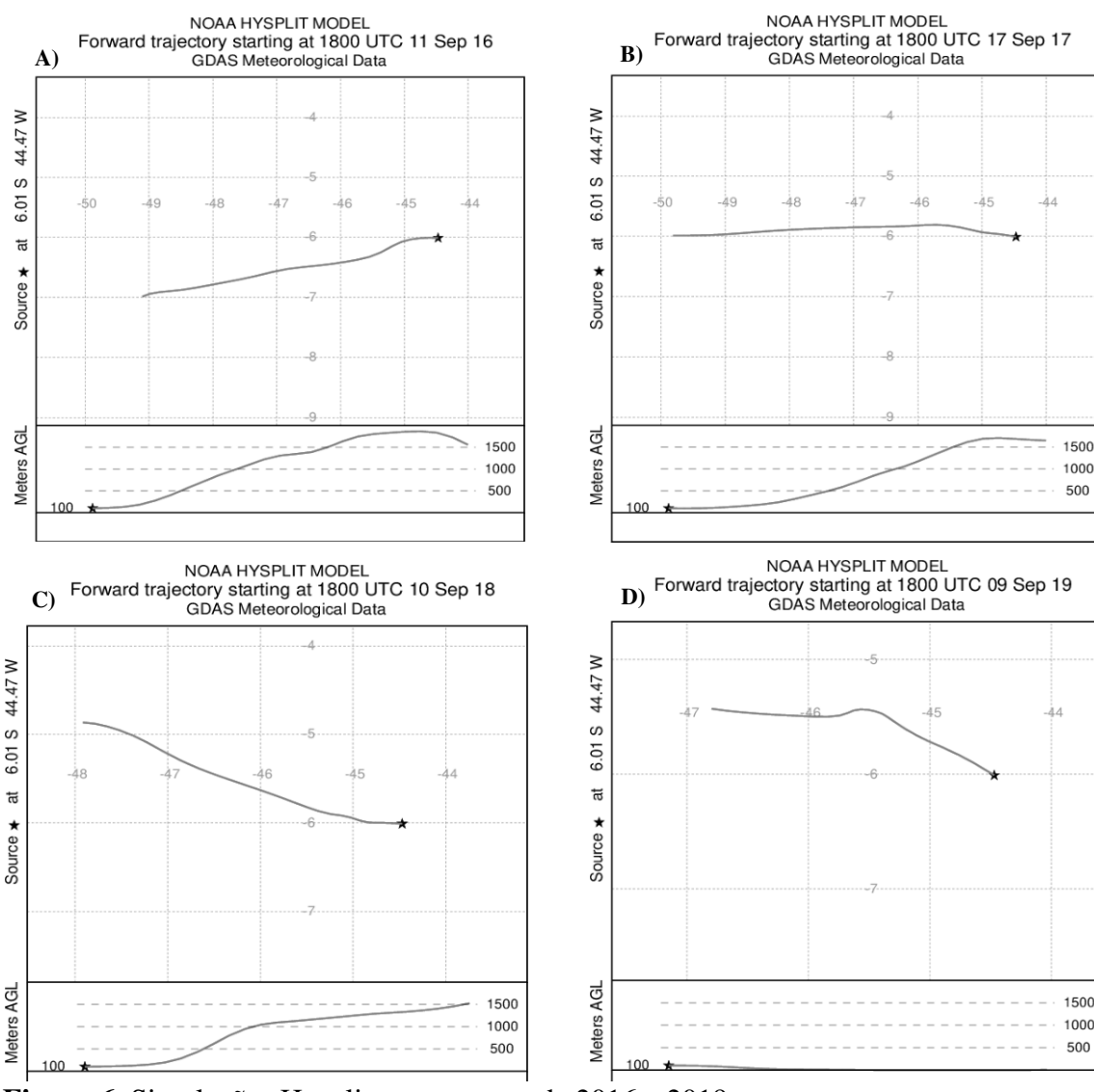


Figura 6. Simulações Hysplit para os anos de 2016 a 2019.

Os resultados revelam que as massas de ar que partem da região de Mirador atingem principalmente as regiões Central, Oeste e Sul do estado. A probabilidade majoritária de transporte de aerossóis é para regiões a favor do vento, com a região Central do estado sendo a mais impactada por essas massas de ar, pois em todos os casos, antes de atingir as demais regiões, as massas de ar passaram pela região central.

As trajetórias assumem vários rumos ao longo do seu percurso, e em função disso, podem afetar diversas cidades. Nas figuras 5B, 5C, 5D, 6B E 6C o vento sopra essencialmente a oeste, apresentando pouca variação ao longo do seu percurso. Nas figuras 5A e 6D o vento sopra na direção noroeste e as trajetórias se mantêm próximas à superfície do terreno. Nas figuras 5E e 5F e 6A inicialmente a trajetória se direciona a

oeste, no entanto ao longo do percurso apresenta variações para noroeste no caso da figura 5E e para sudoeste nas figuras 5F e 6A.

Os municípios da região central do Maranhão requerem uma atenção especial em relação aos níveis de poluição do ar, pois além das queimadas que atingem essa região a cada ano, as simulações Hysplit indicam que esses municípios podem ser influenciados por concentrações de poluentes advindos de queimadas da parte leste do estado, aumentando a probabilidade de dias críticos de poluição. Além disso, a qualidade do ar de parte dos municípios das regiões oeste e sul, também é bastante influenciada pelo transporte de poluentes vindos das regiões leste e central, considerando que as massas de ar que saem de Mirador e passam pelo centro do estado recebe fortes contribuições de queimadas dos municípios de Barra do Corda e Grajaú.

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados encontrados na presente pesquisa conclui-se que o estado do Maranhão apresentou uma grande quantidade de queimadas no período de 2010 a 2019, com destaque para o ano de 2010 que registrou a maior quantidade de focos para o período em estudo.

A maior incidência de focos de calor ocorreu no segundo semestre de cada ano (julho a dezembro), com os meses de agosto a outubro apresentando o pico de ocorrências de focos, devido à ausência de precipitação nessa época do ano.

As concentrações de $MP_{2,5}$ apresentaram padrão sazonal, sendo bastante influenciada pelas queimadas que acontecem durante o período seco no estado. As maiores concentrações foram registradas nos meses de setembro a novembro, dentro do período de estiagem na região. Já as menores concentrações foram registradas nos meses de maio a julho, sendo influenciadas pelo período chuvoso que favorece a dispersão dos poluentes na atmosfera.

As regiões central e leste do Maranhão foram as impactadas por altas concentrações de poluentes, devido a grande quantidade de queimadas nos municípios situados nessas áreas e também pelo favorecimento do transporte de poluentes de uma região para outra.

De modo geral, é possível afirmar que o estado do Maranhão necessita de maior atenção no que se refere aos padrões de qualidade do ar, a alta nas concentrações de poluentes possui impacto direto na saúde e bem estar da população. Ressalta-se também a importância da adoção de uma rede de monitoramento da qualidade ar, que permita a obtenção de dados *in situ* e possa auxiliar na indicação de áreas prioritárias.

7. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, E. L. S. Focos de calor na bacia hidrográfica do Rio Poti (Ceará/Piauí) a partir dos registros do satélite NOAA-18. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 4708-4719, 2017.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Editora Unisinos/ Universidade do Vale do rio dos Sinos, 2003.

ARBEX, M. A.; CANÇADO, J. E. D.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA.; A. L. F.; SALDIVA, P. H. D. N. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 30, p. 158-175, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Conama n.491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>. Acesso em: 14 mar. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 9.992, de 28 de agosto de 2019**. Determina a suspensão da permissão do emprego do fogo de que trata o Decreto nº 2.661, de 8 de julho de 1998, no território nacional pelo prazo de sessenta dias. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2019/Decreto/D9992.htm. Acesso em: 12 de junho de 2022.

BATISTELLA, M.; BOLFE, E. L.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; ARAUJO, L. S. de. **Relatório do diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico do Estado do Maranhão**. Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite; São Luís, MA: Embrapa Cocais, 2013. (Relatório técnico. Embrapa monitoramento por satélite, prod. 3, v. 1).

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Poluentes**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

CORDEIRO, L. C.; SOUZA, M. B. de.; PAIVA, P. F. P. R.; GUSMÃO, M. T. A. de.; SILVA JUNIOR, O. M. da.; BRAGA, T. G. M.; BAIA, M. M. Análise temporal da ocorrência de focos de calor e uso e cobertura do solo no município de Marabá, Pará, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e49011125198-e49011125198, 2022.

DRAXLER, R. R.; AND HESS G. D., 1997: **Description of the HYSPLIT_4 modeling system**. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 24 pp.

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

FREITAS, A. de. M; SOLCI, M. C. **Caracterização do MP10 e MP2,5 e distribuição por tamanho de cloreto, nitrato e sulfato em atmosfera urbana e rural de Londrina**. Química nova, v. 32, n. 7, p. 1750-1754, 2009.

GUERRA, F. P.; & MIRANDA, R. M. de. Influência da meteorologia na concentração do poluente atmosférico PM_{2,5} na RMRJ e na RMSP. In: **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. 2011.

IBAMA. 2015. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Brigadistas do Ibama Combatem Incêndio em Terra Indígena no Interior do Maranhão. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/component/tags/tag/inpe>. Acesso em: jun. 2022.

IBGE. 2020. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Geociências: Área Territorial Brasileira. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial.html>. Acesso em: jan. 2022.

IMBUZEIRO H. A. Queimadas no estado do maranhão no período de maio de 1998 a março de 2003. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, Santa Maria-RS. **Anais...** Santa Maria-RS, p. 1125-1126, 2003.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2022. Disponível em <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>. Acesso em: 30/04/2022.

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

MATAVELI, G. A. V.; SILVA, M. E. S.; PEREIRA, G.; SANTOS, P. R.; CARDOZO, F. DA S.; LIMA, S. F. S.; FRANÇA, D. DE A. & SILVA, F. B. (2018). Modelagem da Contribuição do Cerrado sobre as Emissões Brasileiras de Material Particulado Fino

(PM_{2,5} μm) Associadas à Queima de Biomassa. **Revista Do Departamento De Geografia**, (spe), 118-128.

MATZ, C. J.; EGYED, M., XI, G.; RACINE, J.; PAVLOVIC, R.; RITTMASER, R.; ... & STIEB, D. M. Health impact analysis of PM_{2.5} from wildfire smoke in Canada (2013–2015, 2017–2018). **Science of the Total Environment**, v. 725, p. 138506, 2020.

MENDOZA, E. R. H. **Susceptibilidade da floresta primária ao fogo em 1998 e 1999: estudo de caso no Acre, Amazônia Sul -Occidental, Brasil**. Dissertação (Ecologia e Manejo de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Acre. 2002.

MENEZES, R.H.N. **Caracterização agroclimática e análise do rendimento agrícola do Estado do Maranhão, Brasil**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 168p. 2009

MOREIRA, P.S.P.; Dallacort, R.; Lima, I, F.; Tieppo, R. C.; Santos, C. Concentração de material particulado na região de Tangará da Serra-MT, sul da Amazônia Legal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.6, p.1145-1152, 2014.

NASCIMENTO, F. D. C. A; BRAGA, C. C; ARAÚJO, F. R. D. C. D. Análise estatística dos eventos secos e chuvosos de precipitação do Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 375-386, 2017.

NGAN, F.; STEIN, A.; FINN, D.; & ECKMAN, R. Dispersion simulations using HYSPLIT for the Sagebrush Tracer Experiment. **Atmospheric Environment**, v. 186, p. 18-31, 2018.

RIBEIRO, H & ASSUNÇÃO, J.V. Efeitos das queimadas na saúde humana. **Estudos avançados**, v. 16, n. 44, p. 125-148, 2002.

RIBEIRO, K. V.; ALBUQUERQUE, E. L. S. Análise geoespacial da ocorrência de focos de calor no estado do Piauí (2010 a 2019). **Produção Técnica**. GEOAMBIENTE/UFPI: Teresina, 2020.

RODRIGUES, P. C. D. O. **Mortalidade por doenças cardiovasculares associadas ao PM e suas interações com parâmetros meteorológicos e socioeconômicos na Região**

Centro-Oeste. 2016. 79 f. Tese (Saúde Pública e Meio Ambiente) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2016.

SANTIAGO, A. **Material particulado total suspenso na baixa atmosfera em Cuiabá-MT no período de queimadas.** 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2013.

SANTIAGO, A.; PRADO, R. J.; FILHO, P. M.; ALONSO, R. V. Caracterização do material particulado suspenso no ar de Cuiabá-MT no período de queimadas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.20, n.1, p.273–283, 2015.

SARRA, S.R, & MÜLFARTH, R. C. K. Impactos das queimadas da região Centro-Oeste do Brasil sobre as cidades do estado de São Paulo. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 51237-51257, 2021.

SHAIK, D. S.; KANT, Y.; MITRA, D.; SINGH, A.; CHANDOLA, H. C.; SATEESH, M.; ... & CHAUHAN, P. Impact of biomass burning on regional aerosol optical properties: A case study over northern India. **Journal of environmental management**, v. 244, p. 328-343, 2019.

SISAM - SISTEMA DE INFORMAÇÕES AMBIENTAIS INTEGRADO A SAÚDE. 2022. Ficha técnica Material Particulado $d < 2.5 \mu\text{m}$ (PM2.5) Próximo da Superfície. Disponível em: https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/sisam/v2/static/site/files/ficha_tecnica_concentracao_pm25.pdf Acesso em: 18/05/2022.

SOUZA, A. A.; OVIEDO, A.; DOS SANTOS, T. M. Impactos na qualidade do ar e saúde humana relacionados ao desmatamento e queimadas na Amazônia Legal brasileira. **Instituto Socioambiental: São Paulo, SP, Brasil**, p. 21, 2020.

STEIN, A. F.; DRAXLER, R. R.; ROLPH, G. D.; STUNDER, B. J. B.; COHEN, M. D.; NGAN, F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 96, n. 12, p. 2059-2077, 2015.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; VAN LEEUWEN, T. T.; CHEN, Y.; ROGERS, B. M.; MU, M.; VAN MARLE, M. J. E.; MORTON, D. C.;

COLLATZ, G. J.; YOKELSON, R. J.; KASIBHATLA, P. S. Global fire emissions estimates during 1997–2016. **Earth System Science Data**, v. 9, n. 2, p. 697-720, 2017.

VENEROS, E. M. M. **Impacto das queimas de biomassa na qualidade do ar de cidades da Bolívia**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2021.

VORMITTAG, E. D. M.; DE ARAÚJO, P. A.; CIRQUEIRA, S. S. R.; WICHER NETO, H.; & SALDIVA, P. H. N. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 35, p. 7-30, 2021.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide: report on a WHO working group, Bonn**, Germany 13-15 January 2003. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2003.