UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dryele Fernanda Barbosa Nascimento Miranda

Propriedades Ópticas de Aerossóis Atmosféricos no Semiárido Brasileiro: um Estudo de Caso em Petrolina-PE

Campina Grande, junho de 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PROPRIEDADES ÓPTICAS DE AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: UM ESTUDO DE CASO EM PETROLINA-PE

DRYELE FERNANDA BARBOSA NASCIMENTO MIRANDA

Campina Grande-PB

JUNHO, 2026

PROPRIEDADES ÓPTICAS DE AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: UM ESTUDO DE CASO EM PETROLINA-PE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação apresentada ao CURSO de PPGMET, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de MESTRA EM METEOROLOGIA.

Orientadora: Prof.(ª) Dra. Clênia Rodrigues Alcântara

Área de concentração: Micrometeorologia

Campina Grande-PB

JUNHO, 2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

M672p Miranda, Dryele Fernanda Barbosa Nascimento.

Propriedades ópticas de aerossóis atmosféricos no semiárido Brasileiro : um estudo de caso em Petrolina-PE / Dryele Fernanda Barbosa Nascimento Miranda. – 2026.

96 f. : il. color.

Dissertação (mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2026.

"Orientação: Profa. Dra. Clênia Rodrigues Alcântara".

Referências.

1. Meteorologia. 2. Variáveis Meteorológicas. 3. Aerossóis Grossos. 4. Absorção. 5. Extinção. I. Alcântara, Clênia Rodrigues. II. Título.

UFCG/BC CDU 551.5(043.3)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA ITAPUANA SOARES DIAS GONÇALVES CRB-15/93

DRYELE FERNANDA BARBOSA NASCIMENTO MIRANDA

PROPRIEDADES ÓPTICAS DE AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: UM ESTUDO DE CASO EM PETROLINA-PE

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/6/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
CLENIA RODRIGUES ALCANTARA
Data: 27/07/2026 16:21:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. CLÊNIA RODRIGUES ALCÂNTARA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
gov.br
BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Data: 27/07/2026 10:30:00-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
gov.br
DIMAS DE BARROS SANTIAGO
Data: 27/07/2026 16:32:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. DIMAS DE BARROS SANTIAGO
Programa Nacional de Pós-Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal da Paraíba

"Quando você passar pelas águas, eu estarei com você; quando passar pelos rios, eles não o encobrirão; quando passar pelo fogo, você não se queimará; As chamas não o deixarão em brasas."
Isaías 43:2

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sustentar meus passos durante toda esta caminhada e por me conceder força nos momentos mais difíceis.

À minha família, pelo amor, incentivo e compreensão ao longo desta trajetória acadêmica.

À Prof.ª Dra. Clênia Rodrigues Alcântara, pela orientação, paciência, dedicação e contribuições essenciais para a realização desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade de crescimento acadêmico e científico.

Agradeço à equipe e aos Investigadores Principais (PIs) da rede AERONET pela manutenção, calibração e disponibilização dos dados de aerossóis da estação de Petrolina_SONDA (Versão 3 / Level 2.0 ou Level 1.5). Também expresso meu agradecimento ao NASA Fire Information for Resource Management System (FIRMS), integrante do Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) da NASA, pelo acesso público e gratuito aos dados de focos de calor do sensor MODIS.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Esta pesquisa investiga a presença de aerossóis grossos (1020nm) em Petrolina-PE e suas propriedades de física óptica no período de 2004 a 2019, examinando suas características, distribuição e impactos no sistema micrometeorológico a partir da base de dados (AERONET, INMET, FIRMS), na qualidade do ar e no transporte de massas de ar na região Nordeste do Brasil onde a presença de material particulado tem sua modulação em resposta aos efeitos atmosféricos com tendência em aquecer ao ambiente. Como metodologia usou-se métodos de agrupamento de dados por estação para verificar padrões no período seco e úmido, a partir de médias, máximos e mínimos, expressos com boxplots e análise de séries temporais, assim como método de correlação de Pearson para investigar a massa óptica e a temperatura do ar. Os achados indicam variações sazonais notáveis nas propriedades dos aerossóis, com picos de absorção durante o inverno e a primavera em média foram de (0,057 e 0,059 respectivamente) mostrando quase equivalência e a extinção média máxima foi na primavera 0,167, e mínimos no outono onde a média de absortividade é de -0,184 mostrando atenuação devido ao período de estiagem, influenciados diretamente pela radiação solar e pela temperatura do ar devido ao período prolongado da grande seca histórica. A variabilidade do ciclo diurno ao longo das estações afeta diretamente a variável residual solar e o máximo médio ocorrem no outono (0,131%) é inerente a considerações sobre a taxa de armazenamento da atmosfera e ao período do tempo de suspensão de partículas tende a ser maior devido ao albedo e coincidir ao mesmo período máximo em média durante o outono ser de 0,332. Ou seja, devido às chuvas durante o inverno e a primavera a taxa de quantidade de luz que chega à superfície é menor consequentemente coincide ao período onde favorece os processos de filtragem na atmosfera, ou ainda, ao período onde a magnitude do vento do quadrante nordeste acelera os processos de absortividade e extinção. O presente estudo destaca a importância e compreensão micrometeorológica visando ações para mitigar os impactos ambientais no cenário de emissões atmosféricas.

Palavras-chave: Absorção; extinção; aerossóis grossos e variáveis meteorológicas

ABSTRACT

This research investigates the presence of coarse aerosols (1020 nm) in Petrolina, Pernambuco, and their optical-physical properties from 2004 to 2019. It examines their characteristics, distribution, and impacts on the micrometeorological system—using data from AERONET, INMET, and FIRMS—as well as their effects on air quality and air mass transport in Northeast Brazil, a region where particulate matter levels are modulated by atmospheric effects that tend to warm the environment. The methodology employed seasonal data grouping to identify patterns during the dry and wet seasons—analyzing means, maximums, and minimums via boxplots and time-series analysis—and used Pearson correlation to investigate the relationship between optical mass and air temperature. Findings indicate notable seasonal variations in aerosol properties; average absorption peaks occurred during winter and spring (0.057 and 0.059, respectively), showing near-equivalence, while the maximum average extinction (0.167) occurred in spring. Minimum values were observed in autumn—with an average absorptivity of -0.184, indicating attenuation linked to the dry season—and were directly influenced by solar radiation and air temperature amidst a prolonged, historic drought. Diurnal cycle variability across seasons directly affects the solar residual variable; the average maximum occurs in autumn (0.131%) and is linked to atmospheric storage rates. Furthermore, the particle suspension time tends to be longer due to albedo effects, coinciding with the period of maximum average albedo (0.332) in autumn. In other words, due to rainfall during winter and spring, the amount of light reaching the surface is reduced; consequently, this coincides with a period that favors atmospheric filtration processes, or with a time when northeasterly winds accelerate absorption and extinction processes. This study highlights the importance of micrometeorological understanding, aiming to inform actions to mitigate environmental impacts related to atmospheric emissions.

Keywords: Absorption; extinction; thick aerosols and meteorological variables.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa da delimitação da área de estudo de Petrolina-PE no Nordeste brasileiro 36
Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo Petrolina-PE sobre base do Google Earth 40
Figura 3 – Diagrama esquemático dos métodos utilizados para atingir o objetivo da dissertação 43
Figura 4 – do fluxo na coluna de AOD para Petrólina-PE na banda de 1020 nm 46
Figura 5 – Boxplot da máxima absorção por estação (2004-2019) 49
Figura 6 – Boxplot da absorção negativa por estação (2004-2019) com média geral -0,148 50
Figura 7 – Boxplot da absorção sazonal (inverno, outono, primavera, verão) 2004-2019 51
Figura 8 – Boxplot da variação sazonal do máximo Sun Residual (%) em Petrolina-PE 52
Figura 9 – Boxplot da distribuição sazonal do mínimo de Sun residual (2004-2019) 53
Figura 10 – Boxplot da média do Sun residual por estação (inverno, outono, primavera, verão) 54
Figura 11 – Boxplot da porcentagem de luz solar residual após dispersão por mês em Petrolina-PE 55
Figura 12 – Boxplot da distribuição sazonal do albedo máximo da superfície (2004-2019) por estação 56
Figura 13 – Boxplot da mínima albedo de superfície a 1020 nm por estação (2004-2019) 57
Figura 14 – Boxplot da média do albedo de superfície em 1020 nm por estação (2004-2019) 58
Figura 15 – Comparativo entre absorção e extinção em função do albedo de superfície 60
Figura 16 – Boxplot da distribuição sazonal do máximo de extinção (2004-2019) 61
Figura 17 – Boxplot da mínima albedo de superfície a 1020 nm por estação (2004-2019) 62
Figura 18 – Boxplot da distribuição sazonal da média de precipitação por estação .63
Figura 19 – Precipitação total horária do INMET da precipitação total horária por variação diária (mm) entre 2004 e 2019 65
Figura 20 – Boxplots da variação média mensal da massa AOD por mês 66
Figura 21 – Boxplot da máxima precipitação por estação (2004-2019) com média geral 69
Figura 22 – Boxplot da precipitação máxima por estação (2004-2019) 70
Figura 23 – Boxplot da distribuição sazonal da média de precipitação por estação 71
Figura 24 – Série temporal da temperatura do ar (Tar°C) em Petrolina - PE 72
Figura 25 – Dispersão entre Massa Óptica Relativa (mr) e temperatura do ar (Tar).73

Figura 26 – Boxplot anual da massa óptica de aerossóis por mês 74
Figura 27 – Boxplot da temperatura do ar por estação (2004 – 2019) 76
Figura 28 – Série temporal da velocidade horária do vento (m/s) entre 2004 e 2019 78
Figura 29 – Série temporal da velocidade do vento e componentes médias mensais 80
Figura 30 – Boxplot da distribuição sazonal da máxima, média e mínima de vento (2004 – 2019) por estação..... 82
Figura 31 – Série temporal da umidade específica entre 2004 e 2020..... 83
Figura 32 – Boxplot da distribuição sazonal da máxima, média e mínima da umidade específica (2004–2019) por estação 85
Figura 33 – Atividade de fogo durante a absortividade máxima 87
Figura 34 – Atividade de fogo durante os processos de extinção máxima 88
Figura 35 – Atividade de fogo mínima durante os processos de absortividade e extinção 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Magnitude e componentes médias do vetor vento em Petrolina-PE..... 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACE Aerosol Characterization Experiment

AAOD Absorção Óptica de Aerossol (Aerosol Absorption Optical Depth)

AOD Profundidade Óptica de Aerossóis

AERONET Rede Robótica de Aerossóis (Aerosol Robotic Network)

ASAS Alta Subtropical do Atlântico Sul

BC Carbono Preto (Black Carbon)

BrC Carbono Marrom (Brown Carbon)

CAMS Copernicus Atmosphere Monitoring Service

CALIOP Lidar com Polarização Ortogonal do Aerossol-Nuvem (Cloud-Arossol Lidar with Orthogonal Polarization)

CMIP6 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

DARF Forçamento Radiativo Direto de Aerossóis (Direct Aerosol Radia tive Forcing)

ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EPA Environmental Protection Agency

EUA Estados Unidos da América

FIRMS Sistema de Informação de Incêndio para Gerenciamento de Recursos (Fire Information for Resource Management System)

GMAO Global Modeling and Assimilation Office

HN Hemisfério Norte.

HS Hemisfério sul.

HYSPLIT Modelo Híbrido de Trajetória Lagrangeana de Partícula Única (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)

INMET Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)

LAMAR Laboratory of Atmospheric Microphysics and Radiation

LIDAR Detecção e Alcance da Luz (Light Detection and Ranging)

MERRA Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

MERRA-2 Reanálise da Absorção de Ozônio do MODIS (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2)

MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MT Mato Grosso

NASA National Aeronautics and Space Administration

NDVI Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)

NEB Nordeste Brasileiro

PE Pernambuco

PM2,5 Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 micrômetros

PPGMET Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

RF Floresta Aleatória (Random Forest)

SSA Albedo de Espalhamento Único (Single Scattering Albedo)

TSM Temperatura da Superfície do Mar

UR Umidade Relativa

WMO Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization)

WRF Previsão e Pesquisa do Tempo (Weather Research and Forecasting)

ZCIT Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Objetivos Gerais 16
1.2 Objetivos Específicos 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
2.1 Aerossóis 18
2.1.1 Hemisfério norte 22
2.1.2 Hemisfério sul 26
2.2 Aerossóis e a Micrometeorologia 32
3 MATERIAIS E MÉTODOS 36
3.1 Área de estudo 36
3.2 Dados 37
3.2.1 AERONET 37
3.2.2 INMET 40
4 METODOLOGIA 43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 46
5.1 Discussão dos dados AERONET 46
5.1.1 Fluxo coluna de aerossóis grossos 46
5.1.2 Resíduo atmosférico em Petrolina 55
5.1.3 Albedo superficial comparado com os processos de absorção e extinção de aerossóis em Petrolina 60
5.2 Cenário atmosférico para Petrolina com os dados do INMET 64
5.2.1 Precipitação horária em Petrolina 65
5.2.2 Temperatura do ponto de orvalho ao nível da estação em Petrolina-PE 72
5.2.3 Processos de velocidade de partículas de aerossóis com a massa de ar na microescala em Petrolina 78
5.2.4 Efeitos da umidade específica do ar no ambiente que contém partículas de aerossóis 83
6 MAPAS: ATIVIDADES DE FOGO 87
7 CONCLUSÕES 91
REFERÊNCIAS 93

1 INTRODUÇÃO

Os fluxos de aerossóis atmosféricos são pequenas partículas sólidas ou líquidas em suspensão no ar que exercem papel fundamental nas dinâmicas ambientais e climáticas. No entanto, apesar de desempenhar um papel essencial, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*The Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) ainda os considera de forma secundária, em decorrência das incertezas quanto à sua mensuração e aos efeitos diretos e indiretos sobre o clima (Dal Pai et al., 2012). As referidas partículas modificam o balanço de energia da Terra, uma vez que refletem e espalham a radiação solar, interferindo na temperatura da superfí-cie, no ciclo hidrológico e na formação de nuvens.

Segundo Dal Pai et al. (2012), a radiação solar direta corresponde à fração de energia que atinge a superfície terrestre sem interagir com a atmosfera. Todavia, os fluxos de aerossóis absorvem, refletem e dispersam parte dessa energia, modificando sua intensidade e trajetória. Esse processo está associado às condições atmosféricas locais, havendo variações que ocorrem em decorrência do tipo de partícula, da composição dos regimes de vento e da composição do ar, denominando-se como absorção e extinção. Destaca-se que, em regiões de alta incidência solar, como o Nordeste brasileiro, as referidas interações possuem mais possibilidade de se intensificar em decorrência do forte aquecimento superficial e das dinâmicas típicas do clima semiárido.

De acordo com Oliveira (2013), os fluxos de aerossóis exercem influência direta, ao interagirem com a radiação solar por meio da absorção e do espalhamento, e indireta, ao atuarem como núcleos de condensação de nuvens, modificando o regime de precipitação.

Imagine-se uma atmosfera na qual seja possível separar seus componentes gasosos do que seria sólido, de forma que se possam estimar as partículas grossas de fluxos de aerossóis em sua classificação inorgânica. De modo análogo a essa análise, foi possível investigar com os dados do AERONET (*Aerosol Robotic Network*). A parcela gasosa próxima à superfície se estende em uma camada de absorção e extinção de partículas; porém, esta sofre interação com o meio que compete a uma massa de ar maior.

Estudos recentes, como o de Júnior et al. (2024), ao analisarem a Profundidade Óptica de Aerossóis (AOD) no Brasil por meio de dados do AERONET e do *Serviço*

de Monitorização Atmosférica Copernicus (CAMS), identificaram que os principais valores de AOD ocorrem em Alta Floresta e Ji-Paraná durante a estação seca, enquanto Manaus e Cuiabá apresentam valores menores no período chuvoso. Essa constatação é relevante para o desenvolvimento deste trabalho, que foi estruturado com a divisão entre as estações do ano para distinguir os períodos seco e chuvoso durante as emissões atmosféricas que geram fluxos de aerossóis de queimadas. Esses resultados revelam que existe a influência de fatores sazonais e geográficos sobre as concentrações de fluxos de aerossóis no Brasil. Sabendo disso, o primeiro questionamento a ser feito é: como funcionam as propriedades ópticas no estudo de fluxos de aerossóis interagindo com diferentes superfícies na Terra e na atmosfera?

Tudo começa com uma fonte de emissão atmosférica. Esta, por sua vez, gera material particulado que sofre diversos processos de reação solar no meio atmosférico por meio do balanço radiativo que interage com a partícula e o meio (BOUCHER, 2015). Em contato com a luz, o aerossol passa por processos de reação química e óptica, sendo eles oriundos de fluxos de absorção e extinção de partículas por meio da luz (SEINFELD; PANDIS, 2016). Tais processos de espectrometria óptica têm sensibilidade a diversos tipos de superfície; ou seja, o tempo de suspensão do material particulado na atmosfera depende do albedo de superfície. O período residual solar após a passagem da luz é gerido pela sensibilidade de fótons na partícula com o dinamismo atmosférico em Microescala Meteorológica (STULL, 1988). Em outros termos, o vento auxilia o transporte e a dispersão de material particulado, a quantidade de luz incidente facilita os processos de evaporação de água na atmosfera e, possivelmente, a nucleação pertinente ao desenvolvimento de nuvens (ARTAXO et al., 2002). Esse processo é inerente à precipitação atmosférica. Essa reação funciona como um facilitador de processos absortivos em fluxos de aerossóis de queimadas (KOREN et al., 2004). É notório que, ao final de cada episódio de poluentes, os fluxos de aerossóis funcionam como agentes termorreguladores até findar o processo de deposição, que gera a liberação de energia em diferentes localidades (TWOMEY, 1977).

Apesar da relevância da temática, observa-se, no campo acadêmico, que existe uma escassez de pesquisas que abordem os fluxos de aerossóis em escala micrometeorológica, principalmente no comprimento de onda de 1020 nm, que está atrelado a partículas maiores e menos estudadas.

Diante deste contexto, identifica-se uma lacuna científica quanto à compreensão do comportamento dos fluxos de aerossóis em regiões semiáridas, como Petrolina-PE, local em que o tempo se caracteriza por altas temperaturas, baixa umidade e forte radiação solar, que acaba favorecendo interações atmosféricas específicas.

Esta pesquisa contribui com a discussão científica associada aos processos ópticos e físicos dos fluxos de aerossóis, buscando preencher a lacuna existente nas pesquisas sobre fluxos de aerossóis em 1020 nm na microescala meteorológica, com enfoque na realidade temporal e ambiental do semiárido pernambucano.

O problema apresentado neste estudo versa sobre a seguinte questão: como se comportam os processos de absorção e extinção de fluxos de aerossóis na faixa de 1020 nm em escala micrometeorológica na região de Petrolina-PE e quais são suas relações com as variáveis meteorológicas e as características sazonais do semiárido nordestino?

1.1 Objetivos Gerais

Para viabilizar a resposta do problema supracitado, esta pesquisa possui como objetivo geral analisar os processos de absorção e extinção de partículas de fluxos de aerossóis e sua interação com o meio atmosfera-solo, comparando o comportamento observado em Petrolina-PE com o do Nordeste Brasileiro.

1.2 Objetivos Específicos

a. Investigar as características das estações seca e úmida e as correlações de padrões de absorção e extinção de fluxos de aerossóis em Petrolina-PE, comparando possíveis áreas de potencial de queimadas e fluxo atmosférico;

b. descrever o comportamento dos fluxos de aerossóis diante das propriedades de física óptica e relacioná-lo com as variáveis meteorológicas.

Tudo começa com uma fonte de emissão atmosférica. Esta, por sua vez, gera material particulado que sofre diversos processos de reação solar no meio atmosférico através do balanço radiativo que interage com a partícula e o meio (BOUCHER, 2015). Em contato com a luz, o aerossol passa por processos de reação química e óptica, sendo eles oriundos de fluxos de absorção e extinção de partículas por meio da luz (SEINFELD; PANDIS, 2016). Tais processos de espectrometria óptica têm sensibilidade a diversos tipos de superfície; ou seja, o tempo de suspensão do material particulado na atmosfera depende do albedo de superfície. O período residual solar após a passagem da luz é gerido pela sensibilidade de fótons na partícula com o dinamismo

atmosférico em microescala meteorológica (STULL, 1988). Em outros termos, o vento auxilia o transporte e a dispersão de material particulado, a quantidade de luz incidente facilita os processos de evaporação de água na atmosfera e, possivelmente, a nucleação pertinente ao desenvolvimento de nuvens (ARTAXO et al., 2002). Esse processo é inerente à precipitação atmosférica. Essa reação funciona como um facilitador de processos absortivos em fluxos de aerossóis de queimadas (KOREN et al., 2004). É notório que, ao final de cada episódio de poluentes, os fluxos de aerossóis funcionam como agentes termorreguladores até findar o processo de deposição, que gera a liberação de energia em diferentes localidades (TWOMEY, 1977).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos apresentados nesta revisão bibliográfica fornecem suporte teórico para a compreensão das propriedades ópticas dos aerossóis e suas interações com variáveis meteorológicas. Embora a maior parte das pesquisas esteja associada a análises em mesoescala e escala sinótica, tais estudos contribuem para o entendimento dos processos atmosféricos que também influenciam a microescala meteorológica. Além disso, observa-se uma escassez de pesquisas voltadas especificamente para a análise de aerossóis grossos na faixa de 1020 nm em regiões semiáridas, evidenciando a relevância desta dissertação.

2.1 Aerossóis

É comum afirmar que a coluna de absorção de luz de fluxos de aerossóis foi medida com radiômetros e propriedades de fotometria, conforme os trabalhos de Moosmüller et al. (2009). Nesse artigo, verificou-se a absorção de luz em fluxos de aerossóis e sua medição a partir de uma revisão com métodos numéricos e quantificação com um microfone e um interferômetro, para aplicar filtros e seus dinamismos atrelados à concentração de partículas e sua modulação à entrada de luz. Outro método aplicado para minimizar erros inclui a revisão de Horvath (processos de absorção) e de Bond e Bergstrom para medir a absorção após a passagem de luz sobre a partícula. O intuito foi verificar o espalhamento e sua oscilação em fase e na frequência de luz incidente em carbonáceos.

Em conformidade com os processos de estimativas para a concentração de absorção e modulação da entrada de luz, Horvath (1993) no seu artigo com a temática absorção de luz atmosférica, depende intrinsicamente do comprimento de onda a qual será investigado que é na faixa infravermelho absorvido pelos gases do efeito estufa. Elucidou não haver metodologia padrão para medir o coeficiente de absorção em partículas emitidas. Os fluxos de aerossóis, quando há absorção da luz, convertem a energia luminosa em energia interna e dissipam em forma de calor ao ambiente.

Assim, pode-se inferir que a irradiância se comporta como um corpo negro que absorve a radiação em ambientes e tende a aquecer rapidamente desde a superfície até a atmosfera livre. Lee et al. (2010) constataram em sua pesquisa características distintas de fluxos de aerossóis a partir de um fotômetro solar (AERONET). A partir da metodologia de classificação de fluxos de aerossóis utilizando o radiômetro, foi possível perceber o mapeamento de espectrometria do total de ozônio que se assemelha ao princípio lógico do AERONET. Observaram-se características dos tipos de fluxos

de aerossóis pelo método e sua sazonalidade pertinente ao local, seja ela de poeira ou advinda de queimadas, bem como o transporte e o alcance durante as distintas estações do ano.

Dependendo do processo de mistura espectral e do peso da nuvem, é possível avaliar se uma região possui risco ou não para a navegabilidade. Brock et al. (2021) discutiram as propriedades do aerossol contidas na atmosfera. Com sensoriamento remoto em escala global, foi possível extrair dados sobre as propriedades higroscópicas do aerossol. Também verificaram o comportamento com a variável umidade relativa e monitoraram, através do AERONET, a absorção, extinção, expoente de Angstrom e AOD em superfície, a partir das medições in situ, relacionando a localização dos perfis com seu local de origem. Por meio de uma estação móvel, a aeronave da NASA coletou informações sobre as condições micrometeorológicas do seu percurso. Houve também o planejamento do experimento para evitar condições de voo perigosas (convecção profunda), a fim de realizar medições de fluxos de aerossóis contaminantes e evitar que tais partículas grudem nos instrumentos devido à colisão com hidrometeoros, permitindo estudar os dados precisamente.

É relevante compreender que Fang et al. (2022) investigaram a evolução das propriedades de absorção da luz durante o envelhecimento fotoquímico de fluxos de aerossóis em céu aberto, onde as plumas foram coletadas e bombeadas para a câmara de poluição atmosférica no Sul da China. Trata-se de um estudo sobre as propriedades de absorção da luz de fluxos de aerossóis primários e sua eficiência de absorção em massa em diferentes comprimentos de onda. Os fluxos de aerossóis exercem efeitos direta e indiretamente no quantitativo energético da Terra. Quanto à evolução do coeficiente de absorção da luz e massa para o carbono preto, os pesquisadores realizaram testes para verificar a espessura e heterogeneidade das partículas antes e após aquecer o experimento. Tal condição designou-se altamente poluída devido à baixa volatilidade, e uma das causas foi a má circulação de ar. Todavia, fizeram esclarecimentos sobre o efeito do forçamento radiativo direto para os fluxos de aerossóis em massa, o que implica alterações na quantidade e massa dos fluxos de aerossóis mediante os eventos de queima, além de relacionar diferentes cultivares sob o efeito de branqueamento da partícula e lente, quando reagidos com diferentes comprimentos de onda.

CHENG et al. (2025) estudaram a temática de avaliação de fontes de poluição de carbono preto em cidades industriais e riscos à saúde no noroeste da China usando

observações de absorção de luz, via medições de carbono preto em Urumqi, China. Dadas as condições meteorológicas, o carbono preto pode ser transportado para longas distâncias, até o processo de deposição resultar numa notável redução do albedo superficial e possível aumento em doenças cardiovasculares e respiratórias. O estudo se baseou no método de repartição das fontes devido à queima de biomassa e combustão. Eles também analisaram a fonte potencial relacionando a direção e velocidade do vento e sua sazonalidade e probabilidade de dispersão, além de comparar o ciclo diurno com as proporções das emissões de veículos durante as estações do ano. Foi observado o transporte de massa de carbono preto sendo influenciado pela velocidade dos ventos e a localização geográfica de áreas agrícolas (período antecedente às safras), as quais são regiões susceptíveis à queima de biomassa, com o HYSPLIT. As concentrações maiores de carbono preto foram no período diurno do que quando comparado com o período noturno, o que é intuitivo falar, justificando as aglomerações urbanas e transporte de longo alcance em direção aos países da Ásia Central. Outro fator alarmante é a tendência a riscos maiores à saúde durante o inverno (proporção de 4 vezes maior do que no verão).

Considerando a esfericidade da partícula, esta é estritamente correspondente à fase de tempo. Chen et al. (2021) estudaram a distribuição vertical para a aplicação de AOCH na modelagem de PM2,5 em diferentes concentrações e na sua distribuição espacial no Canadá e EUA. Eles compararam os dados de média mensal PM2,5 do MERRA-2 com as observações da EPA e das redes de monitoramento das interagências de ambientes virtuais protegidos (IMPROVE); logo, os coeficientes de extinção são calculados em função da razão de mistura para cada tipo de aerossol. Existem diferenças diante da distribuição vertical: o AOCHM encontra-se próximo à camada limite planetária, e os dados de PM2,5 com o MERRA são superestimados. Para os estudos de comparação com diversas bases de dados para estimar a concentração de PM2,5, utilizou-se uma correção quando interpolados antes da comparação, objetivando analisar o NDVI sobre superfícies; também foram usadas máscaras aplicadas a nuvens sob imagens de satélite e diversas informações acerca da refletância em superfície interagindo com os fluxos de aerossóis.

O artigo de ZHANG et al. (2022) trata das incertezas do forçamento radiativo direto de fluxos de aerossóis em céu limpo associadas às propriedades ópticas com base em modelos globais do CMIP6. Os pesquisadores enfatizaram a perturbação de

fluxos de aerossóis de origem antrópica no balanço de radiação e questões de incerteza em modelos climáticos. Também mostraram que estimativas onde a fração de aerossol absorvente é alta denotam a importância das propriedades de espalhamento aplicadas com dados do CMIP6 na estimativa do DARF (Forçamento Radiativo Direto de Aerossóis). Quando negativo, as estimativas DARF assumem propriedades compensatórias, e isso reflete criticamente na quantidade de fluxos de aerossóis, que são influenciados pela sensibilidade de variáveis meteorológicas. Entretanto, os autores verificaram que os fluxos de aerossóis ficam mais suscetíveis à dispersão no verão e no outono, justificando a alta umidade. Para os meses DJF e MAM, os fluxos de aerossóis absorventes são tipicamente maiores no inverno. No estado de mistura atmosférica global, o DARF é incerto e extremamente misto, contribuindo para comparar o AOD nas estações boreais e na primavera. Logo, em todo céu existe um DARF, mas isso é atribuído a condições de céu claro.

WEBER et al. (2022) analisaram um neflômetro e medições de fotômetro de absorção tricolor; o estudo trata de propriedades de fluxos de aerossóis, incluindo o expoente de Angstrom para a extinção de luz, espalhamento, absorção e outros parâmetros em diversos comprimentos de onda. Contudo, a pesquisa resultou em grandes erros de precisão, valores baixos de absorção da luz e altos valores de albedo aplicados no laboratório pelo método diferencial em medições baseadas em filtros em partículas flutuantes. Por meio de técnicas de sensoriamento remoto, calcularam os expoentes de extinção de Angstrom, que influenciam o clima; fizeram correções das medições pela técnica de truncamento e, com isso, evitaram a propagação de erros caso os instrumentos de medição não estivessem calibrados. Com o parâmetro de Pearson e regressão linear, estimaram os coeficientes de espalhamento, extinção e absorção. Com o albedo de espalhamento simples, foi possível comparar as medições com os fluxos de aerossóis puros e de misturas externas para verificar o expoente de Angstrom de absorção, o AOD e o albedo de espalhamento simples, concluindo que os instrumentos atenderam aos objetivos da pesquisa.

Chen et al. (2024) constataram que o albedo de superfície regula o efeito climático direto dos fluxos de aerossóis. Estes são críticos para o equilíbrio do balanço energético atrelado ao efeito radiativo direto e ao aquecimento, em que as mudanças macro e microfísicas das nuvens afetam os fluxos radiativos em fluxos de aerossóis antropogênicos. Durante o inverno, a turbulência de convecção no hemisfério norte é mais fraca, dificultando a entrada de fluxos de aerossóis de poeira no continente. Nota-

se que o impacto do albedo de superfície no AWE (efeito por aquecimento de fluxos de aerossóis) e ADRE (efeito radiativo direto dos aerossóis) apresenta características de fluxos de aerossóis mais finos e absorvidos com mais facilidade devido ao efeito de resfriamento. Globalmente, observou-se variação em cada hemisfério: no HN diminui e no HS aumenta. A descoberta da pesquisa foi que, com exceção da região polar, o efeito de resfriamento radiativo em ondas curtas compensa os efeitos de temperatura. Por outro lado, o albedo dependia da transmitância atmosférica na variação média mensal através dos dados do AERONET.

2.1.1 Hemisfério norte

LI et al. (2016) pesquisaram sobre interações meteorológicas de fluxos de aerossóis e monções na Ásia atreladas à severidade de secas e enchentes. Seus efeitos alteram o estado termodinâmico atmosférico, determinando características que governam a escala de tempo diurna e associando-as a fatores antropogênicos. Isso pode implicar mudanças no clima e nos fenômenos, por meio de simulações de modelos, para entender os processos de nucleação e desenvolver esquemas de parametrização concretizados somente em superfície. Usaram dados do infravermelho e visível para estimar, na faixa respectiva, a concentração numérica e comparar com o impacto ocorrido nas mudanças das partículas, utilizando o MODIS e o satélite asiático para verificar a tendência de variação, a fim de usar a visibilidade como medida padrão e estudar a qualidade do ar em grandes cidades.

Os fluxos de aerossóis estão presentes em toda a atmosfera terrestre; no entanto, a concentração é mais densa no Hemisfério Norte. De acordo com Gaetani et al. (2014), que analisaram a projeção da disponibilidade energética e a simulação dos cenários de emissões para estimar a trajetória de poluição atmosférica, houve também a análise da absorção, assim como da interação aerossol-nuvem e seus efeitos na atmosfera. Através do uso de modelagem climatológica a partir do modelo $ECHAM5-HAM$, foi possível investigar os cenários de emissão e das concentrações dos gases de efeito estufa. A avaliação do desempenho fotovoltaico e suas implicações para a redução de fluxos de aerossóis e suas variações de conteúdo na atmosfera resultaram em um aquecimento global previsto; consequentemente, houve um aumento da temperatura da superfície e do gradiente térmico inter-hemisfério norte-sul.

Queface et al. (2011) investigaram a climatologia das propriedades ópticas dos fluxos de aerossóis na África Austral através do fotômetro solar CIMEL Sun Photometer (um radiômetro espectral alimentado por energia solar). Para restaurar os dados através de um algoritmo, a fim de investigar as propriedades ópticas com o intuito de observar a variação da espessura óptica do aerossol a partir de médias mensais em 500 nm em Mongu e Skukusa, relatou-se que seus picos sazonais ocorrem durante a primavera, quando acontece a queima da biomassa. Dado o exposto, as mudanças interanuais na carga de fluxos de aerossóis (ago, set, out) nas duas cidades são bastante significativas para as estimativas, devido ao potencial de forçamento radiativo no subcontinente em sua sazonalidade, comparando-se a magnitude da espessura óptica e sua variação para os episódios em condição de céu claro e modo grosso.

Cole e Paterson (2010) investigaram os possíveis efeitos das mudanças micrometeorológicas na corrosão atmosférica na Austrália, que apresenta níveis muito elevados de contaminação, devido à presença de sal ou poluentes. Vale destacar que as mudanças nos padrões do vento podem alterar a dispersão dos poluentes. Os fluxos de aerossóis de sal podem ser produzidos pelas cristas brancas no oceano ou pelas ondas, os quais podem viajar até 50 km pelo ar e têm seus efeitos de corrosão em rochas e construções civis, além de provocarem a redução da precipitação nas regiões de alcance.

Sabendo que a presença da biomassa e de núcleos de sais favorece as chuvas na Amazônia, funcionando como um filtro natural atmosférico e reduzindo assim os poluentes onde há variação meteorológica da umidade relativa do ar, Martinez et al. (2020) discutiram em sua pesquisa os eventos meteorológicos extremos nos Andes Centrais do Peru utilizando um conjunto de instrumentos especializados. Verificaram que ocorre a convergência dos fluxos de umidade impulsionados termicamente que vêm do Oceano Pacífico e da Bacia Amazônica. Em 2019, entre agosto e setembro, ocorreram muitas queimadas florestais na região amazônica, principalmente no Brasil e no norte da Bolívia; os autores analisaram as correlações entre eventos de alta poluição, geadas intensas e chuva intensa na região peruana.

A previsão em microescala tem grande importância nas análises de simulações de cenários de emissões atmosféricas, pois, com ela, obtêm-se ferramentas para verificar a direção para a qual a parcela está se deslocando. Yang et al. (2011) avaliaram previsões em escala regional de fluxos de aerossóis, estratocúmulos marinhos e suas interações durante o VOCALS-REx usando WRF-Chem. Com observações no AERO,

foi possível realizar a comparação com a simulação do MET (temperatura e umidade do MBL) e a quantidade de fluxos de aerossóis, para avaliar o efeito da radiação no período diurno, resultando em um tempo de vida maior. Com isso, foi possível investigar as propriedades ópticas e microfísicas para elucidar os efeitos diretos e semidiretos do aerossol, bem como averiguar melhorias possíveis para retroalimentar a simulação das características da camada limite e dos quantitativos energéticos, além de estudar os processos de fluxo de poluentes sobre o oceano.

Helmig et al. (2012) estudaram os fluxos de ozônio atmosfera-oceano durante os cruzeiros TexAQS 2006, STRATUS 2006, GOMECC 2007, GasEx 2008 e AMMA 2008. A partir de trilhas de cinco cruzeiros de pesquisa, com o objetivo de reunir informações sobre o ciclo do carbono e processos físicos para controlar as trocas de gases ar-mar sob condições de vento forte, obtiveram resultados sobre a concentração de ozônio e a variabilidade do fluxo de ozônio. Diante disso, observou-se que a absorção de ozônio aumenta com a velocidade do vento. Houve também uma tendência de aumento do fluxo oceânico com a proximidade das regiões costeiras.

BAO et al. (2024) abordaram a temática das propriedades de fluxos de aerossóis continentais e a recuperação de absorção usando um método de aprendizado de máquina específico para sensoriamento remoto. Abordaram, também, a utilização de imagens de sensoriamento remoto por satélite, além de discutirem a absorção e a limitação do aprendizado de máquina sobre os padrões sazonais. Utilizaram em sua pesquisa o modelo de RF capaz de aprender as propriedades do aerossol na maioria dos cenários atmosféricos e de absorção. Concluíram que as entradas são utilizadas em modelos físicos maduros e incorporaram condições meteorológicas nos parâmetros do modelo para minimizar os paradigmas ao realizar a pesquisa. Por fim, verificaram que a abundância de dados auxiliares tende a obscurecer as informações valiosas das imagens de satélite.

YU et al. (2023) enfatizaram que o efeito radiativo direto do aerossol (ADRE) é sensível a fatores ambientais. A simulação de aerossol MERRA-2 é integrada ao modelo GOCART (Goddard Chemistry, Aerosol, Radiation, and Transport), permitindo a comparação com imagens de satélite e também por modelos de regressão e predição para o hemisfério norte, tanto para as condições de céu limpo quanto para céu encoberto. Os efeitos radiativos diretos do aerossol influenciam o transporte meridional de calor, impulsionado pelo ADRE (e/ou posição da ZCIT), em comparação com a simulação para um planeta sem fluxos de aerossóis. Contudo, é relevante discorrer sobre

a heterogeneidade em seus padrões de distribuição global energética. Os critérios de padrões ADRE devem-se à sensibilidade do ADRE ao AAOD atingir o pico em regiões de alto albedo da superfície, enquanto a sensibilidade do ADRE ao albedo da superfície aumenta com as cargas de fluxos de aerossóis.

Dadas as considerações de Moschos et al. (2024), o estudo objetivou a caracterização e análise de espectrometria de massa, a quantificação da absorção óptica, além de avaliar o impacto no transporte de massa de ar e a conexão entre substâncias na atmosfera e riscos à saúde humana. Mais especificamente, analisaram-se dois cenários: queimadas controladas e queimadas florestais, principalmente na Bacia do Congo, na África Ocidental e nas savanas do sul da África. A presença de carbonáceos apresenta riscos à saúde humana porque a absorção para este grupo elementar é mais lenta. O estudo realizou medições para registrar a taxa de variação da atenuação da luz que passa por um filtro carregado de partículas. A análise para a coleta de filtros de aerossol para medições de composição química, além do BrC com pa-drões e nível molecular de fluxos de aerossóis de BrC em câmara e ambiente, bem como o clima regional e o transporte de massa de ar intercontinental, é significativa no estudo sobre absorção óptica.

Tuccella et al. (2025) modelaram a absorção de carbono preto e marrom e seu impacto radiativo em um estudo de caso dos intensos incêndios florestais boreais canadenses de junho de 2023. Os autores destacam a importância de parametrizações semelhantes para simular os efeitos radiativos do BC ocasionados por queimadas que, por sua vez, são importantes para o impacto climático. Utilizou-se o modelo quí-mico CHIMERE para simular a absorção de BC e BrC, acoplado on-line com o modelo meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF[1]). Para investigar os dados de emissões antropogênicas de gases traço e partículas, estas foram retiradas do inventário global do Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS).

O estudo desenvolve a habilidade do modelo em reproduzir a carga de aerossol, como, por exemplo, emissão, transporte de longo alcance e deposição (costa leste da América do Norte e oceano Atlântico). Sem o parâmetro de absorção, os modelos superestimam o efeito de resfriamento durante os períodos de queimadas. O trabalho

[1] Weather Research and Forecasting, um sistema de modelagem numérica de escala regional para previsão do tempo e pesquisa atmosférica.

visa também estimar a volatilidade dos compostos em diferentes graus de perturbação.

HUEBERT et al. (2003) elucidaram uma visão geral da ACE-Asia: estratégias para quantificar as relações entre os fluxos de aerossóis asiáticos e os seus impactos climáticos. As extensas medições do ACE-Asia de espectros de profundidade óptica de aerossol, albedos de dispersão única, frações finas e outras propriedades são muito úteis na derivação do forçamento radiativo do aerossol. Esse mapeamento de conjunto de dados é de grande importância para mostrar a evolução horária a mensal da profundidade óptica da coluna de aerossol.

Outra questão relevante é que Wang et al. (2024) focam na compreensão sobre a intensificação do ciclone de latitude média pela interação entre aerossol e radiação, aumentando o transporte de fumaça de queimadas florestais canadenses para o nordeste dos EUA. Foi possível a construção de um inventário de dados (MODIS, AERONET, US-EPA) para monitoramento climático e caracterização do episódio de poluição atmosférica causado por queimadas florestais com dados meteorológicos e avaliação de modelos. Foram identificadas as vias de transporte da fumaça de queimadas florestais que geraram recordes no leste da América do Norte. Os fluxos de aerossóis de fumaça e radiação no ciclone de latitude média favorecem o transporte de fumaça em concordância com o vento. Dado o exposto, os sistemas frontais, especialmente correias transportadoras quentes, favorecem o transporte de fluxos de aerossóis e influenciam a interação aerossol- radiação e interação aerossol-nuvem, contribuindo assim para a previsão de eventos extremos.

2.1.2 Hemisfério sul

Pode-se afirmar que a quantidade de poluentes na camada residual de material particulado altera o regime das chuvas, existindo o forçamento orográfico que altera o fluxo radiativo e a espessura de cada camada atmosférica. Em suma, Wiedensohler et al. (2018), em sua pesquisa, explicam os mecanismos de emissão e transporte de carbono negro para a troposfera livre na área metropolitana de La Paz/El Alto (Bolívia) com base no Dia do Censo (2012). Por meio de um fotômetro de absorção multiangular, foi possível determinar o coeficiente de absorção da luz para estudar o monóxido de carbono; também, mediante dados fornecidos por uma estação no aeroporto, como o sistema LIDAR, foi possível perceber a energia máxima emitida através dos dados coletados no observatório. Analisaram-se os fatores que contribuem para a análise da

orografia diante do inventário de emissões de carbono preto. Em altitudes mais elevadas, é provável que a pluma seja transportada através da convecção térmica (durante o período diurno nas encostas das montanhas) no Altiplano Boliviano, gerando circulações locais impulsionadas pelo fluxo orográfico.

Como outra contribuição sobre as queimadas e poluentes resultando em alterações expressivas no aumento da temperatura próximo à superfície terrestre em áreas afetadas, Yuan et al. (2022) discutiram a temática "Poluição severa por fluxos de aerossóis de queima de biomassa durante a queimada florestal na Amazônia 2019 e seu impacto na força radiativa: uma perspectiva espacial a partir da recuperação do MODIS". Por meio do sensoriamento remoto com a base de dados MODIS, foi possível investigar as plumas anômalas de fumaça transportadas pelo vento desde a floresta amazônica até o território paraguaio, visualizando-as com simulações ARF. Através da dispersão e absorção radiativa na atmosfera e de alterações sistemáticas no albedo nas superfícies, comprovou-se a presença de carbono preto e seus efeitos de forma mensurável e expressiva nos dados de temperatura atmosférica e da superfície terrestre. Durante as simulações, demonstrou-se a absorção de massa emitida durante as queimadas na Amazônia em 2019, o que provocou uma mudança no saldo de radiação e efeitos de aquecimento na atmosfera.

Henao (2020), em sua pesquisa, avaliou a influência dos fluxos de aerossóis nos processos radiativos e fluxos superficiais turbulentos no Vale do Aburrá (no norte e no leste da Colômbia). Por meio do AERONET, mediram-se as propriedades ópticas do aerossol em diferentes bandas; com radar, foi possível verificar os perfis de vento e, com o radiômetro, a temperatura e a umidade. Utilizou-se o sensor de turbulência (IRGASON) para analisar a covariância no infravermelho e a absortividade tridimensional. Para observar a interação do sistema de energia radiante e a espectrometria para verificar a absorção — que, por sua vez, reduz a radiação solar que chega à superfície devido à presença de fluxos de aerossóis —, ocorrem mudanças no quantitativo de energia em superfície.

Mukkavilli et al. (2019) avaliaram os fluxos de aerossóis atmosféricos a partir de dois produtos de reanálise sobre a Austrália. Foi possível comparar os dados do MERRA-2 e MACC/ECMWF com o AERONET, utilizando dados de satélite ou reanálise para averiguar os dados de poeira. A análise conclui que, para o entendimento da trajetória de micropartículas, é necessário que elas estejam em concordância com a circulação geral em outros níveis de camadas atmosféricas.

YANG et al. (2021) enfatizaram em sua pesquisa os dados de múltiplas fontes de longo prazo sobre as características das propriedades ópticas e tipos de fluxos de aerossóis na Austrália, abordando análises com os dados do MERRA-2, CALIPSO e AERONET para verificar as variações espaço-temporais de diferentes fluxos de aerossóis. Foram adotados dois métodos, Kaskaows et al. (2007) e Giles et al. (2012), para distinguir a origem do aerossol e simular as possíveis trajetórias (HYSPLIT); também foi calculada a trajetória de retorno pelo método da distância euclidiana. Na oportunidade, descrevem-se as queimadas como as principais fornecedoras de fluxos de aerossóis de poeira, relacionando-as com a combustão de biomassa durante a estação seca. Constatou-se que as principais concentrações ocorreram na primavera devido à queima de biomassa. Estes fluxos de aerossóis são transportados de oeste e sudeste pelos fluxos de ar.

MMAME et al. (2023), em seus estudos, demonstram a avaliação do desempenho do modelo CMIP6 e imagens de satélite para o estudo e simulação de aerossol atmosférico e precipitação sobre a África. A região da África Oriental sofre chuvas extremas influenciadas pelo movimento norte-sul da ZCIT, além da umidade do Oceano Índico facilitada pelos ventos de leste, e secas devido à presença de fluxos de aerossóis absorventes atmosféricos. Os fluxos de aerossóis atmosféricos têm impactos nos processos físicos na atmosfera, como o forçamento radiativo e os ciclos de nuvens.

Flores-Rojas et al. (2021) descreveram os eventos meteorológicos extremos nos Andes Centrais do Peru usando um conjunto de instrumentos especializados. Utilizaram radares e sensores para estudar a ocorrência de eventos meteorológicos do LAMAR (Laboratório de Microfísica e Radiação), a fim de estimar as componentes do balanço energético e possíveis eventos extremos para investigar a intensidade, a frequência e as variações meteorológicas. Devido à grande quantidade de queimadas que afetou a América do Sul em diversas regiões de queima de biomassa, os valores próximos ao Observatório de Huancayo correspondem aos máximos ocorridos (Peru, Bolívia e Amazônia).

Além disso, Belhadji et al. (2025), em sua pesquisa, comprovam o quadro evolutivo inicial do mini-buraco de ozônio gerado pelas queimadas florestais australianas de 2019–2020, observados por satélite e instrumentos terrestres. Este estudo foi possível por meio do TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) para mensurar o espectro de radiação solar no infravermelho e ultravioleta, para investigar os perfis de

observação do ozônio — OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite) — e também da química atmosférica. O estudo também usou os dados do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather) para obter eficiência ao detectar sistemas atmosféricos gerados pela vorticidade. O estudo de massas de ar de origem antropogênica de queimadas, de fato, gerou um vórtice anticiclônico com trajetória no Hemisfério Sul. Com a interação do CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) space-LiDAR, houve níveis elevados de extinção, além dos efeitos de absorção de fluxos de aerossóis no vórtice e possíveis quadros de evolução do sistema, correlacionando os processos de dispersão atmosférica.

O impacto das partículas nos processos de turbilhões em microescala é fundamental para a precisão das previsões na faixa de 1020 nm e seus efeitos na superfície.

Quando há a presença de partículas orgânicas no ambiente, estas se volatilizam mais rápido (os fluxos de aerossóis são mais suscetíveis a aumentar a área de queimadas), sofrendo catálise; nesse contexto, a poeira tende a amortecer os fenômenos atmosféricos e os sais tendem a amplificar os sistemas atmosféricos. Diante disso, Aiken et al. (2009), em seu estudo, delinearam uma abordagem analítica sobre a Cidade do México durante o MILAGRO, usando espectrometria na composição de partículas orgânicas, a partir da verificação da sensibilidade do modelo de pesquisa e previsão meteorológica (WRF-Chem) para investigar a quantidade de emissões de $PM_{2,5}$. As emissões são, em sua maioria, causadas por ações antrópicas de precursores semivoláteis e de volatilidade intermediária (SIIVOC), resultando nas emissões padrão.

Conceitualmente, existe a problemática de que as medições são em escala local e não abrangem uma área maior. Isso tende a uma precisão em escala local maior nas estimativas estatísticas; no entanto, para as estações, requerem-se monitoramento e recalibração dos instrumentos, o que justifica uma menor evasão dos dados.

ASSUNÇÃO (2009) estudou a composição química da água da chuva, quantificando as partículas finas em suspensão na atmosfera e os processos de fluxos de aerossóis carbonosos (químico, térmico, óptico, termo-óptico). Verificou-se que a presença de fluxos de aerossóis na atmosfera inibe a precipitação, ressaltando a interação com o meio; comparando com o albedo, a interação com as nuvens tende a uma maior refletividade. Destaca-se a importância do aerossol carbonoso na Meteorologia e o fato de que seus efeitos, quando inalados, causam danos à saúde humana.

Além disso, Buchard et al. (2017) esclarecem informações sobre o uso de conjuntos de deslocamento local (LDEs) para caracterizar as substituições de plumas. Isso significa que a estrutura vertical dos campos de fluxos de aerossóis nem sempre é simplesmente o resultado do dimensionamento dos campos de previsão, na qual se fez necessário o incremento da AOD (profundidade óptica do aerossol) para aprimorar as análises e a assertividade dos modelos. Comparando com o incremento da AOD, este teve uma diminuição acentuada em simulações off-line; vale ressaltar que, durante a análise em regiões vulcânicas ativas, deve-se ter cuidado. O artigo também relata um forte evento de poeira no Saara ocorrido em abril de 2010, mostrando que os fluxos de aerossóis desempenharam um papel importante no carregamento de poeira a longa distância, dos desertos do norte da África através do Atlântico até o Caribe.

O solo tem sua importância no balanço energético da Terra, porém a variável que rege o equilíbrio em microescala é a umidade específica do ar, apesar da influência de outras escalas, visto que o albedo tem sua parcela de contribuição quanto à permeabilidade e densidade do solo no arrasto de flutuação dos turbilhões próximos à superfície terrestre.

LIU et al. (2024) utilizaram dados de séries históricas e projeções futuras da carga global de poeira a partir de modelos CMIP6 com correção de viés. Embora o modelo tenha sido estudado, foi possível demonstrar que a variabilidade interna e as incertezas do cenário diminuem significativamente na África Austral e na América do Sul. No entanto, existem grandes desvios nas simulações de modelos de poeira devido a observações limitadas em escala global, dado que o estudo prediz historicamente com o CMIP6 e compara com séries históricas do passado no MERRA2. As interações não são somente de ponte primária de incidência solar, mas também atuam como núcleos de gelo e núcleos de condensação de nuvens e, assim, afetam as trocas de CO_2 entre a atmosfera e áreas oceânicas.

Vale salientar que WAGNER et al. (2025) retratam a quantificação de emissões de poeira causadas por queimadas usando o modelo global de aerossol. Com isso, observou-se, durante as investigações do estudo, uma parametrização aplicada a emissões provenientes de queimadas, relacionando o poder radiativo do fogo e as condições do solo em função das condições atmosféricas durante 10 anos com ICON-HAM e o viés quantitativo de área de risco de potencial de fogo. Através do ICON, foi

adicionado aos estudos de conservação de massa e transporte com projeções o modelo JSBACH, para contabilizar as interações terra-atmosfera de modo estatístico, além do módulo de aerossol HAM pela química atmosférica MOZART. Foi possível derivar a relação entre emissões com diferentes tipos de solos e velocidade do vento em baixos níveis. Diante disso, durante as simulações, foi possível buscar padrões de vento e o arrasto de fuligem com sua evolução caótica e condições atmosféricas/meteorológicas. Contudo, na pesquisa, houve a validação do conjunto de dados MIDAS e a análise global dos AOD pelas estações do AERONET, cuja distribuição de dados foi desigual no Hemisfério Sul. Diante do conjunto de dados GFAS para as simulações, houve uma distinção entre os dados de emissões de queimadas regionais; também existe outro tipo de aerossol oriundo de outras regiões, transportado pelo vento em escala sazonal, além da distribuição vertical da atmosfera.

O efeito do transporte atmosférico de micropartículas tende a lapidar o material particulado para um formato esférico, podendo chegar ao tamanho de um átomo indivisivelmente, facilitando o transporte a longas distâncias. Diante disso, a parcela de fluxos de aerossóis tem suas propriedades físicas variando com as condições de tempo.

Foram identificados as causas e os fatores para o deslocamento da parcela de AOD. Diante disso, Rosas et al. (2025) abordam em seu estudo o transporte de fumaça e o impacto radiativo da queima de biomassa sobre a cidade de São Paulo: um estudo de caso de evento extremo. No trabalho, analisou-se o transporte de uma densa nuvem de fumaça por medições instrumentais e usaram-se dados de reanálises para estimar a densidade da posição de partida da parcela de fluxos de aerossóis e sua trajetória com o HYSPLIT, com deslocamento oriundo da fronteira entre a Bolívia e o Brasil, além de comparar com os dados de vento médio a partir dos dados do MERRA em 500 nm para estimativa de AOD. O artigo estimou a irradiância solar na superfície, e a passagem de uma frente fria facilitou o transporte de fluxos de aerossóis da região do MASP, que seguiram na direção noroeste-sudeste, sendo que a pluma teve origem no Centro-Oeste brasileiro. Logo, o estudo enfatiza aspectos importantes do ponto de vista radiativo e, quando houve combinação de nuvens e fumaça, também apresentou uma eficiência de extinção radiativa 7% maior em comparação com outros dias nublados.

Para Chen et al. (2024), os autores constataram que o albedo de superfície regula o efeito climático direto dos fluxos de aerossóis, crítico para o equilíbrio do

balanço energético atrelado ao efeito radiativo direto e ao aquecimento, em que as mudanças macro e microfísicas das nuvens afetam os fluxos radiativos. Em uma descrição volátil, os fluxos de aerossóis antropogênicos afetam o fluxo radiativo tanto para aquecer quanto para resfriar a Terra. Durante o inverno, a turbulência de convecção no Hemisfério Norte é mais fraca, dificultando a entrada de fluxos de aerossóis de poeira no continente. Nota-se que o impacto do albedo de superfície no AWE e ADRE apresenta características de fluxos de aerossóis mais finos e absorvidos com mais facilidade devido ao efeito de resfriamento. Globalmente, observou-se variação em cada hemisfério, onde o HN diminui e o HS aumenta. A descoberta da pesquisa foi que, com exceção da região polar, o efeito de resfriamento radiativo em ondas curtas compensa os efeitos de temperatura. Por outro lado, o albedo dependia da transmitância atmosférica na variação média mensal através dos dados do AERONET.

2.2 Aerossóis e a Micrometeorologia

GALLAGHER et al. (1997) contextualizaram, em seu artigo, as "Medições de fluxos de aerossóis para a floresta de Speulder usando uma técnica micrometeorológica". Foram comparadas as medições com valores da literatura obtidos por precipitação e técnicas semelhantes ao método de correlação de vórtices de deposição de aerossol submicrométrico em uma floresta. A fim de verificar a velocidade de deposição em todo o espectro de tamanho do aerossol, observou-se que estes processos sofrem influência do período chuvoso. Eles concluíram ser possível estabelecer uma parametrização simples da velocidade de deposição como uma função de estabilidade e a correlacionam com a dimensão dos fluxos de aerossóis na faixa de 0,1–1,0 μm e com o tipo de vegetação, o que é difícil de interpretar, pois os dados comparados são de magnitudes distintas.

O conjunto de elementos sobre a pesquisa de GELHAUSEN et al. (2011) teve como temática a "Caracterização de fluxos verticais de fluxos de aerossóis por espectrometria de massa de partículas individuais para análise micrometeorológica". Os pesquisadores utilizaram a metodologia por meio do LAMPAS 2, que se designa como um espectrômetro de massas a laser bipolar on-line móvel para analisar os espectros de massa, especificando que os diâmetros das partículas variaram entre 0,2 μm e 2 μm. Foi usado um anemômetro ultrassônico para determinar os vetores verticais do vento, o que verificou a presença de íons positivos e negativos na composição do carbono. Para analisar o espectro, a partícula teve uma melhor resposta para a massa off-line via agrupamento fuzzy, que foi uma abordagem útil para separar partículas de

diferentes composições em classes específicas. Com o estudo da velocidade do vento, foi possível estimar o comportamento do fluxo de emissão e deposição das partículas de fluxos de aerossóis presentes na atmosfera e processos turbulentos pró-ximos à superfície da Terra.

"A velocidade de deposição seca de partículas de aerossol sobre superfícies naturais: quantificação de acordo com o diâmetro das partículas" foi o aprofundamento da pesquisa de PELLERIN et al. (2017) sobre sete campanhas experimentais, que foram conduzidas acima de diferentes superfícies naturais (milho, solo descoberto, pastagens e floresta) entre 2007 e 2015. Utilizaram o método de correlação para medir fluxos de deposição seca e, então, gerar velocidades de deposição seca no experimento para estimar flutuações das partículas durante 30 minutos, para investigar o fenômeno de emissão fisicamente validado e correlacionado com o diâmetro das partículas. O cenário dos fluxos de aerossóis sofre influência de cada superfície natural na deposição; é explicado principalmente nos dados fornecidos pela velocidade de atrito relacionando-se com os elementos de rugosidade, e também teve outro parâmetro enfatizado na pesquisa: o índice de área foliar. Em média, concluíram que a maioria do fluxo de deposição é de partículas finas (<0,1 μm).

Na busca por aprofundamento, Lindau et al. (2021) estudaram as partículas gigantes de poeira no Nevado Illimani: um indicador da convecção profunda no verão sobre o Altiplano boliviano. A metodologia empregada nas amostras no laboratório foi realizada através do equipamento Beckman Coulter Multisizer 4. Um orifício de 100 μm foi utilizado para medir a concentração de poeira e a dimensão do grão (400 canais de tamanho no intervalo de 2 a 60 μm) e cada simulação foi feita com uma lâmina; para isso, cada amostra foi derretida. A partir da análise instrumental de ativação por nêutrons, representa-se o conjunto de amostras durante as estações seca e chuvosa. Um dos resultados no artigo retrata que, quanto mais intensa é a convecção no verão, maior é o número relativo de partículas grandes de poeira suspensas na atmosfera, e isso se dá através do longo alcance de partículas grandes. Em contrapartida, durante o inverno, responde principalmente aos intensos processos de reevaporação que ocorrem em atmosfera seca com baixa atividade convectiva.

O estudo de Li et al. (2023), que tem por tema Impactos da cobertura de neve nas condições micrometeorológicas e na qualidade do ar rural no nordeste da China, foi conduzido em Fujin no período de 2019 a 2020, para verificar se há relação entre

a profundidade da neve e a qualidade do ar. A deterioração da visibilidade atmosférica/qualidade do ar ocorreu com mais frequência em dias com neve do que em dias sem neve, e a visibilidade média diária tende a diminuir. De fato, é imperativo abordar as possíveis causas ambientais da poluição por neblina sobre áreas de cobertura de neve sazonal, bem como os impactos da cobertura de neve nas condições micrometeorológicas e fenômenos de transporte turbulento na baixa atmosfera.

Conforme o contexto da pesquisa de ZHANG et al. (2024), seu estudo compreende análises sobre a influência da força do sistema climático interno na relação entre os ciclones tropicais do Atlântico Norte e a poeira do Saara. Sendo a maior região árida do mundo, o Deserto do Saara produz todos os anos uma grande quantidade de fluxos de aerossóis de poeira, transportados através do Atlântico Norte sob o efeito do vento leste. Segundo as análises do presente estudo, que utilizou análises estatís-ticas e simulações de modelos, o efeito radiativo dos fluxos de aerossóis de poeira tem um impacto negativo nos ciclones tropicais. Os dados de outubro indicam que uma explicação potencial aponta que o menor cisalhamento zonal do vento, acompa-nhado pelo fortalecimento da pluma de poeira do Saara, pode causar maior ocorrência de trajetória e intensificação de ciclones tropicais.

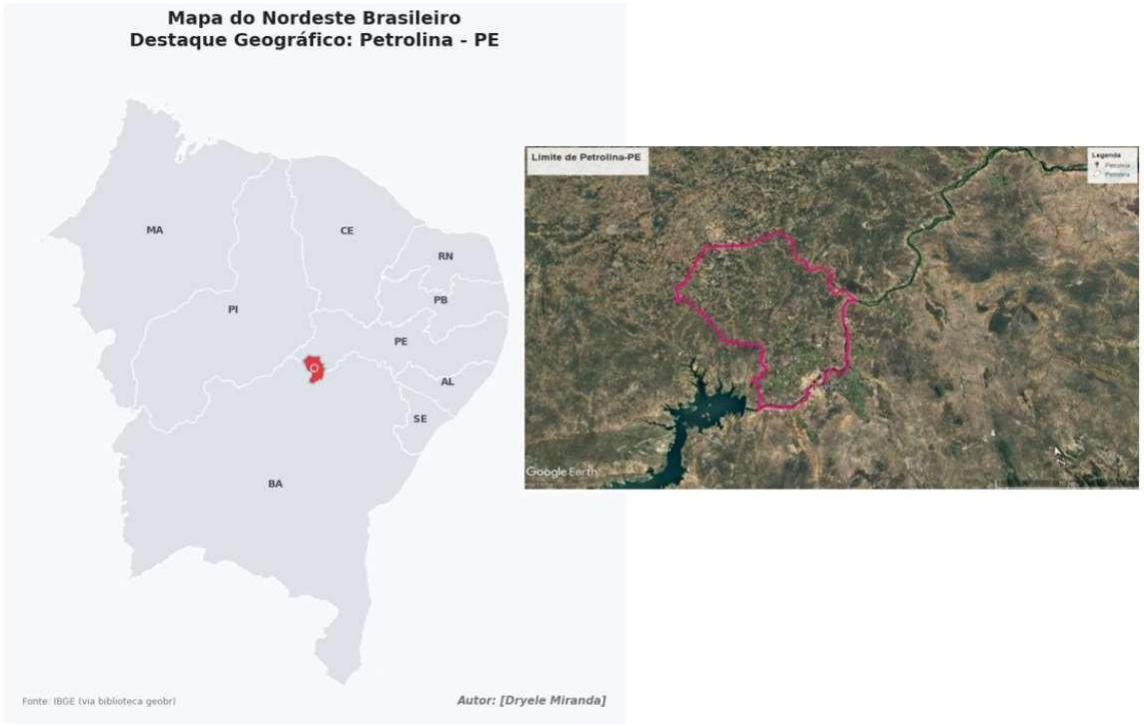
LIU et al. (2024), em suas investigações sobre os fluxos de aerossóis troposféricos sobre o Oceano Atlântico Norte ocidental durante as implantações de inverno e verão do ACTIVATE 2020: ciclo de vida, transporte e distribuição, dão ênfase às principais fontes de fluxos de aerossóis (poluição urbana e tempestade de poeira). Para esse estudo, foi necessária a medição das propriedades ópticas, incluindo a absorção e dispersão; todavia, esse aspecto é trivial para a contextualização das "mudanças climáticas e o meio ambiente". Objetivando estudar todo o ciclo de vida, transporte e distribuição de fluxos de aerossóis sobre o ONAO durante as duas missões de voos em aeronaves em diferentes altitudes, na faixa de (a 550 nm) com o lidar King Air HSRL-2 e recuperações de satélite CALIOP/CALIPSO (a 532 nm), observou-se a extinção de fluxos de aerossóis muito maior na BL e grandes aumentos na extinção em torno de 5 km de altitude; as emissões marinhas para a AOD na área de voo e ao redor das Bermudas são significativamente maiores em relação ao inverno. Tais fato-res influenciam a presença de nuvens em sua formação microfísica por estarem diretamente relacionados com aspectos hidrometeorológicos e destacam a necessidade de monitoramento e dinâmica atmosférica.

MANAVI et al. (2025) analisaram em sua pesquisa no campo experimental sobre a variabilidade espacial dos fluxos de aerossóis atmosféricos: impactos na qualidade do ar e nas mudanças meteorológicas. Este artigo observa a variabilidade mais acentuada de fluxos de aerossóis no modo de acumulação ($0{,}1 - -2{,}5\mu m$) e no modo grosso (acima de $2{,}5\mu m$) em áreas urbanas e regiões industriais. Fazendo comparativos entre a região maior (Europa) e 1 sobre uma área urbana (Atenas, Grécia), a variabilidade espacial vemos enaltecer o transporte de massa em grandes distâncias com o PMCAMx (Modelo Abrangente de Qualidade do Ar de Matéria Particulada com extensões) e PMCAMx-PSAT (Particulate Source Apportionment Technology). Com essas ferramentas, foi possível identificar as concentrações de $PM_{2,5}$. Cujo objeto de estudo são fluxos de aerossóis finos e possíveis causadores de doenças infectocontagiosas e cardiovasculares, os quais influenciam o aquecimento global. Para entender essas nuances, foi necessário usar modelagem meteorológica com projeções, e durante a análise discutem que a redução dos fluxos de aerossóis possui uma tendência de aumento térmico e seria necessário implementar a gestão e controle de qualidade do ar. Em outros termos, podemos inferir que a dispersão e a absorção da radiação solar por fluxos de aerossóis na altitude da camada de ar reduzem o fluxo de calor, enfraquecem a turbulência e aumentam a umidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Figura 1 – Mapa do Nordeste brasileiro destacando Petrolina-PE



Fonte: IBGE e Google Earth.

Figura 1: Delimitação da área de estudo situada no Nordeste do Brasil para verificar a sazonalidade a partir dos dados de reanálise.

A cidade de Petrolina-PE está localizada no semiárido do Nordeste brasileiro, onde se encontra uma das principais incidências de radiação solar do país. Esta cidade foi escolhida por ser a única disponibilizada na base de dados AERONET e com controle de qualidade garantido pela NASA. Quando comparada com a cidade de Natal-RN, esta última apresentava uma série de dados pequena e com falhas nas variáveis principais para realizar este estudo, o que foi um fator determinante para a escolha dos dados.

Petrolina é classificada como uma região tropical semiárida, tipo BSh (clima semiárido quente), segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). A absorção de fluxos de aerossóis tende a ser mais alta durante os meses de inverno (junho a setembro) devido à tendência crescente do aquecimento atmosférico em superfície; devido a ações antrópicas e aos dados de concentração coincidente de fluxos

de aerossóis totais, ocorre a liberação de mais partículas de fluxos de aerossóis provenientes de queimadas, tendendo a aumentar a toxicidade na atmosfera (SANTOS; SILVA, 2018). São aspectos importantes para verificar o padrão sazonal dos fluxos de aerossóis; em outros termos, poderíamos dizer que resultaria em um processo de filtragem atmosférica no qual as partículas de fluxos de aerossóis são absorvidas/extintas, sendo elas sensíveis à dinâmica atmosférica característica do local. Com os dados do AERONET (HOLBEN et al., 1998), será possível esclarecer informações mais assertivas no âmbito da Meteorologia em escala local e sobre as propriedades ópticas dos fluxos de aerossóis.

3.2 Dados

3.2.1 AERONET

O código de inversão da AEROSOL ROBOTIC NETWORK (AERONET), em sua documentação, fornece informações acerca das propriedades ópticas de fluxos de aerossóis na coluna atmosférica total, derivadas da radiação direta e difusa medida pelos radiômetros de sol/céu AERONET Cimel AERONET (2010), que, por sua vez, são essenciais para os processos de estimativa de absorção e extinção de partículas na atmosfera. Petrolina-PE será a área de estudo. Suas coordenadas e elevação (9.06910° sul, 40.32011° oeste) situam-se a 381.0 metros de altitude, cujo período da série temporal é de 06/07/2004 a 04/08/2019. Foi utilizada a AERONET Versão 3 Petrolina_SONDA Versão 3 - Inversão Almucantar Nível 2,0. Os dados têm qualidade garantida com calibração pré e pós-campo aplicada a todos os pontos. Esses dados são submetidos a um rigoroso protocolo de garantia de qualidade, assegurando sua confiabilidade. Os fluxos de aerossóis foram analisados a partir de medições feitas em 1020 nm. A resolução temporal dos dados é diária.

A análise ocorreu em Petrolina, pois essa foi a única estação com dados sem falhas para cobrir o evento de fluxos de aerossóis de queimadas na análise sazonal, cujos dados da AERONET são categorizados em diversas bandas termais, mas esse estudo é focado na banda de 1020nm.

Lista de variáveis extraídas:

c. $Spectral_Flux_Up[1020nm]$ e $Spectral_Flux_Down[1020nm]$;
d. $Spectral_Flux_Diffuse[1020nm]$;
e. $Average_Solar_Zenith_Angles_for_Flux_Calculation(Degrees)$;
f. $Coincident_AOD440nm$;
g. $Surface_Albedo[1020m]$;

h. $Sun_Residual(\%)$.

Diante disso, a resolução espectral foi de 1020 nm. Pode-se ainda afirmar que os dados de inversão foram baixados no nível 2.0 de forma instantânea e contínua. Para maior aproveitamento da série, foi usado o método para classificar a série pela faixa espectral de 1020 nm em fluxos de aerossóis grossos de queimadas, utilizando-se o Excel e o Python para efetuar os devidos cálculos e métodos de visualização em Boxplot, respectivamente.

Realizou-se a correlação de Pearson para averiguar se existe correlação entre os dados de temperatura do ar e a massa óptica, visando esclarecer como funciona a absorção e a extinção de fluxos de aerossóis de queimadas durante as estações.

As variáveis fornecidas podem ser usadas para calcular a absorção e a extinção espectral do aerossol nas seguintes faixas de comprimento de onda com os dados disponíveis no AERONET:

440 nm (azul)

675 nm (vermelho)

870 nm (infravermelho próximo)

1020 nm (infravermelho)

Os critérios para a escolha de dados de fluxo consistiram em associar o fluxo de coluna de fluxos de aerossóis grossos com as componentes de absorção e extinção de fluxos de aerossóis ópticos. Para delimitar o estudo de tais componentes, foi necessário investigar qual comprimento de onda sofreria influência pela faixa espectral de 1020 nm (infravermelho).

Lei de Lambert-Beer

Quando um feixe monocromático de radiação solar atravessa um meio absorvente, há atenuação. Essa atenuação pode ocorrer tanto por absorção, como também por difusão, justifica-se assim a coloração azul do céu.

Se $I_{e\lambda}$ representar a intensidade da radiação que incide no topo de uma camada de material absorvedor de espessura dz, aceita-se que a atenuação d $I_{e\lambda}$ é dada pela Lei de Beer (Haltiner e Martin,1957):

$$d\,I_{e\lambda} = -k_\lambda \rho ds I_{e\lambda} \qquad (1)$$

Onde ρ é representado como a densidade do meio e ds designa o percurso efetuado pela radiação ao atravessar a camada em questão $k_\lambda$tem dimensões L^2 / M é chamado de coeficiente monofásico de absorção, variando com comprimento de onda, juntamente com a pressão e a temperatura (Berry, Bollay e Beers,1945). Na equação (1) vemos o sinal negativo e isso implica na atenuação da

intensidade.

Notoriamente, se a direção da propagação forma um ângulo Z com a vertical local, daí a espessura da camada atravessada pela radiação será dz=dscosZ. Logo,

$$d\,I_{e\lambda} = -k_\lambda \rho ds I_{e\lambda}/cosZ \qquad (2)$$

O próximo passo é integrar a equação (2), e isso ocorre apenas quando o K não variar ao longo do percurso e quando dispuser se de único absorvente, atrelado ao comprimento de onda selecionado:

$$I_{e\lambda 0} = I_{e\lambda z}\, exp[-secZ \int_z k_\lambda \rho\, dz] \qquad (3)$$

Onde $I_{e\lambda 0}$ e $I_{e\lambda z}$ estão sendo usados para exprimir a intensidade observada na base(o) e no topo(z) da camada absorvedora respectivamente

No geral se faz:

$$\psi = \sec Z \int_z k_\lambda \rho\, dz = msecZ \qquad (4)$$

Onde m é a massa seccional, ou profundidade ótica, da camada. As dimensões da profundidade ótica são M/L² e fisicamente representa a massa do meio absorvente que exista uma coluna vertical, com área de seção reta unitária de espessura dZ é evidente que a massa seccional(m) depende da densidade absorvente.

Logo,

$$I_{e\lambda o} = I_{e\lambda z}\, exp(-k_\lambda \psi) \qquad (5)$$

A absorção espectral pode ser calculada como a diferença entre o fluxo espectral descendente e o fluxo espectral ascendente, fórmula simplificada da Lei de Beer:

Absorção = Fluxo Espectral Descendente - Fluxo Espectral Ascendente

A extinção espectral pode ser calculada como a soma da absorção e do fluxo espectral difuso:

Extinção = Absorção + Fluxo Espectral Difuso

O primeiro fator de enquadramento dos dados para as variáveis Spectral_Flux_Up[1020nm] e Spectral_Flux_Down[1020nm] foi deixá-las no intervalo entre 0 e 1, a fim de centralizar os dados em torno de 0, para identificar os valores máximos e mínimos em torno da média da série temporal.

Além disso, outro critério fundamental foi especificar que o comprimento de onda de 1020 nm é menos afetado pela atenuação atmosférica do que comprimentos de onda mais curtos, como o azul (440 nm) ou o vermelho (675 nm), o que o torna mais adequado para a observação de partículas em ambientes com variação da temperatura no período seco e úmido.

Contudo, também foi calculada a massa óptica relativa m_r para ângulos zenitais solares menores que cerca de 80º. A massa óptica relativa é bem aproximada pela secante do ângulo zenital solar (ângulos zenitais solares médios para cálculo do fluxo (graus)):

$m_r = 1/cos(\theta_z)$, conhecido como secante zenital.

Pelo modelo simples, o cálculo teórico da massa óptica vê a possível variação em torno da radiação solar nos fluxos de aerossóis de queimadas.

3.2.2 INMET

Para avaliar as condições atmosféricas na estação meteorológica em Petrolina-PE, foram baixados os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para investigar como as variáveis meteorológicas (temperatura do ponto de orvalho, vento, umidade específica, precipitação, albedo de superfície) interferem no processo de ascensão e deposição de fluxos de aerossóis atmosféricos. A resolução temporal dos dados é diária.

Figura 2 – Mapa de localização da estação meteorológica em Petrolina-PE



Fonte: Google.

Figura 2: Estação meteorológica em Petrolina-PE, localização.

Para isso, a estação de PETROLINA, como podemos ver na Figura 2, cujo código é 82983, foi utilizada para recriar a atmosfera passada e coincidir com o período dos dados do AERONET. Suas coordenadas geográficas são -9.3886111 e -40.52333332, resultando em uma altitude de 372,54 m. A série histórica de dados começa no dia 06 de julho de 2004 e a data final é 04 de agosto de 2019. Também é importante salientar que a periodicidade da medição é horária.

A coincidência das coordenadas fornecidas (para AERONET e INMET) é um ponto crucial de qualidade dos dados. Isso significa que as medições de fluxos de aerossóis (espessura óptica de aerossol) e as variáveis meteorológicas de apoio (vento, umidade específica, temperatura do ar, precipitação), que abrangem o período de 2004 a 2019, apresentam variabilidade temporal e local.

A estação está em área urbana e representa a atmosfera local, porém não se limita à estrutura de análise micrometeorológica. Existe a influência de fontes antropogênicas, sendo classificada como regional e sazonal com bastante significância, em que os dados são pontuais. Todavia, a influência regional dominante é proveniente da queima de biomassa e poeira do solo. Além disso, a circulação de brisa de vale influencia o transporte de material particulado e é um mecanismo a ser considerado quando se avalia a dinâmica da camada limite planetária. É um fator importante para verificar o ciclo de aquecimento e resfriamento do solo.

3.2.2.1 Métodos Específicos: INMET

Os dados foram coletados de uma estação convencional foram coletados de forma horária, a temperatura de bulbo seco equivale a variável da temperatura do ar.

Estimou-se a pressão de vapor de saturação, que é a pressão que o vapor de água exerce quando está em equilíbrio com a água líquida na mesma temperatura.

*e = 6.112 * exp(17.67 * Td / (Td + 243.5))*

Para isso, utilizaram-se os dados de (Td), que é a temperatura do ponto de orvalho em (°C), a fim de mensurar a umidade específica do ar:

Onde "P" é a pressão atmosférica no nível da estação em mbar, e "e" é a pressão de vapor de saturação em kg/kg.

A umidade específica do ar é um elemento climático importante para a caracterização do tempo da localidade de Petrolina-PE. Além disso, os seus indicadores contribuem para a formação de chuvas, a atenuação da amplitude térmica e a manutenção das temperaturas terrestres, bem como para os efeitos da maritimidade em Petrolina-PE, assumindo, assim, propriedades reguladoras do ambiente.

3.2.2.2 FIRMS

A requisição de download é pela seleção do país Brasil, com resolução de 5 km a cada trimestre de acordo com as estações do ano para os dados de fonte pela reanálise MODIS (or Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e o formato usado foi shp. O período da série temporal é 06/07/2004 à 04/08/2019, para basear nos extremos de absortividade e extinção de partículas e ser possível comparar a

região Petrolina com áreas circunvizinhas partindo do princípio de áreas com atividade de fogo em tempo real.

4 METODOLOGIA

O método a seguir descreve os procedimentos implementados para caracterizar vários aspectos dos eventos de fluxos de aerossóis e suas propriedades físicas, ópticas e sensibilidade a variações atmosféricas em microescala de 06/07/2004 a 04/08/2019, incluindo as propriedades, os padrões de circulação atmosférica e os tipos de caracterização dos elementos de rugosidade que influenciam na trajetória dos fluxos de aerossóis. O diagrama esquemático dos métodos é evidenciado na Figura 3. Figura 3 – Diagrama esquemático dos métodos utilizados para atingir o objetivo da dissertação



Fonte: Próprio autor.

Figura 3: Diagrama esquemático dos métodos utilizados para atingir o objetivo da dissertação.

Para este propósito, descrevemos a distribuição trimestral dos dados de propriedades radiativas para estimativas de fluxos ópticos, a fim de obter um parâmetro comparativo numérico médio trimestral para todas as variáveis de superfície de uma estação meteorológica, visualizando-as a partir das tabelas resumo foi extraído os gráficos boxplot de (máximo, mínimo e média). Tal procedimento permitiu a análise horária de eventos de aerossóis absorvidos e extintos, ajudando a garantir a análise de possíveis episódios de incertezas devido à ausência de dados observacionais históricos na região nordestina brasileira.

Utilizou-se o método da correlação de Pearson a fim de investigar a relação entre a massa óptica e a temperatura do ar pela equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$

Onde n é o número amostral.

x_i: Valor individual da massa óptica/espessura óptica no momento i.

$\bar{x}$: Média aritmética dos valores de massa óptica.

y_i: Valor individual da temperatura do ar no momento i.

$\bar{y}$: Média aritmética dos valores de temperatura.

Esta medida quantifica o grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas.

A seguir, descreve-se o procedimento detalhado usado para caracterizar todos os eventos de fluxos de aerossóis para este estudo, utilizando dados de múltiplas fontes para o padrão de dados atípicos da localidade de Petrolina-PE: dados de AOD, absorção, extinção e variáveis meteorológicas.

- Agrupamento dos dados em trimestres (primavera, verão, outono, inverno);
- Cálculo de média, mínimo e máximo para todas as variáveis em cada trimestre;
- Elaboração de boxplots de máximos, mínimos e médias para todas as variáveis, separadas por trimestre (primavera, verão, outono, inverno);
- Análise de séries temporais para identificar tendências sazonais.
- Análise de correlação entre as variáveis da AERONET e do INMET para identificar relações sazonais entre fluxos de aerossóis e clima, e verificar possíveis relações com episódios de queimadas;
- Correlação entre os principais fenômenos meteorológicos históricos que tendem a influenciar a microescala;

- Elaboração de gráficos de séries temporais sazonais, mapas, fluxogramas, entre outros, para apresentar os resultados;

A plotagem foi realizada diretamente após o controle de qualidade e a limpeza dos dados do INMET e da AERONET. Por meio dela, foi possível estudar a evolução temporal das propriedades ópticas médias diárias e horárias do aerossol em 1020 nm, além da possibilidade de integrar a análise da trajetória e da massa de material particulado provenientes de queimadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

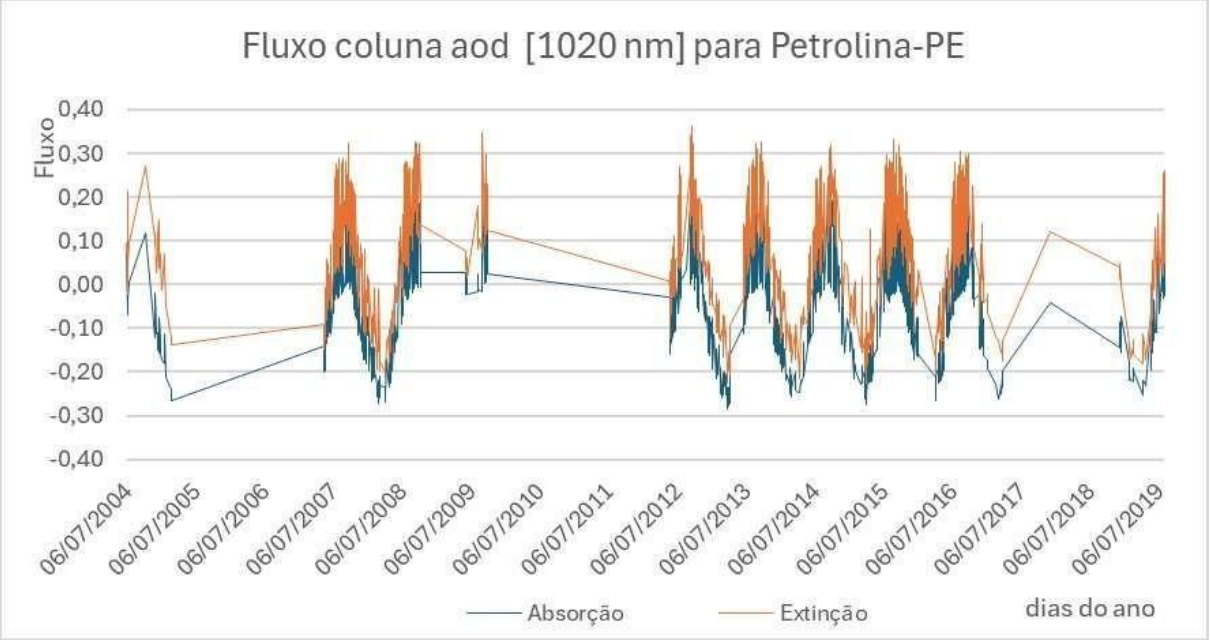
5.1 Discussão dos dados AERONET

5.1.1 Fluxo coluna de aerossóis grossos

Os fluxos de aerossóis de queimadas foram detectados em possíveis variações de atenuação, seja pela mudança de fase ou pela mudança do composto. Segundo a banda espectral de 1020 nm em estudo, isso ocorre devido à radiação solar direta e pelo espalhamento de Rayleigh; as partículas de fluxos de aerossóis assumem propriedades absorvedoras em contato com a luz. Ou seja, os desvios do feixe de luz da fonte primária (Sol) dependem do estado de energia da molécula na camada superficial atmosférica, o que gera o aquecimento da superfície do solo em direção às camadas superiores da atmosfera.

Dado isso, as partículas de fluxos de aerossóis se tornam um sumidouro energético quando interagem no comprimento de onda incidente, contudo, se faz necessário analisar o ciclo diário e seu comportamento ao longo dos anos, com parâmetros micrometeorológicos de fluxo energético, em Petrolina-PE.

Figura 4 – do fluxo na coluna de AOD para Petrolina-PE na banda de 1020 nm



Fonte: AERONET.

Figura 4: Série temporal da espessura óptica de extinção e absorção de aerossóis na faixa espectral de 1020 nm, derivada dos dados da AERONET.

A Figura 4 mostra o fluxo de aerossóis grossos em 1020 nm em Petrolina-PE para investigar se, na série temporal para as variáveis absorção e extinção, existe um

padrão coerente com os principais eventos meteorológicos; todavia, quando se fala em micrometeorologia, essa escala tende a ser influenciada pelos sistemas meteorológicos de mesoescala e grande escala. As unidades de medida para a absorção e extinção são W/m²/nm; no eixo x, constatamos os dados correspondentes aos dias do ano e, no eixo y, observamos a componente fluxo.

As características das séries, quando observamos a Figura 4, dependem dos processos termodinâmicos na atmosfera, da topografia, do rearranjo químico de molécula a molécula e dos constituintes atmosféricos que interagem com a radiação eletromagnética. Os diferentes tipos de fluxos de aerossóis que podem contribuir para a absorção e extinção são: poeira, fumaça, sais marinhos, fluxos de aerossóis orgânicos e sulfatos. Porém, este estudo tem como foco as partículas de fuligem, sendo uma das variações detectadas na faixa de 1020 nm, que, por sua vez, não se limita a 1020 nm e está presente em todas as faixas espectrais, desde a superfície até a atmosfera livre.

Foi possível identificar que a extinção de fluxos de aerossóis apresenta valores mais altos em setembro e valores mais baixos em abril, com um detalhe específico: os valores de extinção são sempre maiores que os da componente absortividade; po-rém, nota-se que a cada 3 anos ocorre uma repetição cíclica da onda, o que é um comportamento específico para Petrolina. A hipótese seria testar se o comportamento da série é retilíneo ou não, em comparação à AOD com ângulo de espalhamento quando a concentração de fluxos de aerossóis existia antes de ser extinta/absorvida em Petrolina-PE. Apresenta um comportamento quase zonal ou em torno de 1 (adimensional), todavia é diferente do fluxo coluna em 1020 nm, que é uma onda.

Em regiões semiáridas, a absorção de fluxos de aerossóis pode ser mais alta durante os meses mais secos (julho, agosto e setembro), devido ao aumento da poeira e fuligem em suspensão. O comportamento regional em uma região semiárida é descrito por temperaturas elevadas, baixa amplitude térmica anual e chuvas escassas e mal distribuídas, com longos períodos de seca. Por isso, observa-se a tendência de decréscimo à esquerda e à direita dos valores mais altos, e o dado tende a apresentar o padrão de onda.

Analisando ainda as séries, os vales são mais achatados e representam uma menor quantidade de dados se comparados às regiões de máxima variabilidade nos ápices, e estes, por sua vez, são mais estreitos. Isso é um indicativo de que os máximos de velocidade de reação molécula a molécula, resultando em uma tendência de

dissipar mais energia, encontram-se na região positiva do conjunto de dados da série; já os mínimos ocorrem de maneira inversa. Entre 2009 e 2012, num período de aproximadamente 3 anos, observa-se um "buraco" na série, indicando condições de incertezas referentes ao cenário de emissões; corrobora também padrão similar entre 2005 e 2007 e entre 2017 e 2018, em intervalos de aproximadamente 2 anos.

A absorção é mais baixa durante os meses mais quentes, ou seja, durante os meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro); a absorção de fluxos de aerossóis tende a ser menor devido ao aumento da precipitação, que remove os fluxos de aerossóis da atmosfera, pois as chuvas funcionam como um filtro. Além disso, o aumento da atividade fotoquímica pode formar menos fluxos de aerossóis absorventes.

O padrão sazonal dos dados de extinção, em sua efetividade, é maior do que a distribuição de dados de absorção; o comportamento é ondulatório. O valor máximo da série ocorreu no dia 21/09/2012, e o valor correspondente é 0,36 para as componentes de fluxo óptico em Petrolina. Podemos comparar com as propriedades ópticas na África Ocidental tropical (Ilorin, na Nigéria), que correspondem aos dados da AERONET também, com média sazonal para valores mínimos de 0,36 (estação chuvosa), geralmente no período diurno para ambos os casos.

Já o valor mínimo em Petrolina-PE ocorre no dia 01/04/2013 e seu valor é - 0,23. Isso se deve ao contraste resultante proveniente de dispersão e dissipação em larga escala, tornando-se uma característica específica de Petrolina; ou seja, a par-cela se desprende da superfície por empuxo através do diferencial de temperatura e pressão atmosférica.

Para os dados de distribuição sazonal da série temporal de absortividade máxima, cujo valor é 0,25 em Petrolina, podemos estabelecer comparação com plumas de poeira mista e mistura de poeira com outros compostos derivados de ações antropogênicas (Saara e Ásia). Tal fenômeno foi estudado no artigo de Sung-Kyun et al. (2019) também por meio de dados da AERONET, e a relação de mistura tem seu comportamento subestimando fortemente a contribuição do BC (carbono preto) para a absorção de luz em plumas de poeira mista do Saara.

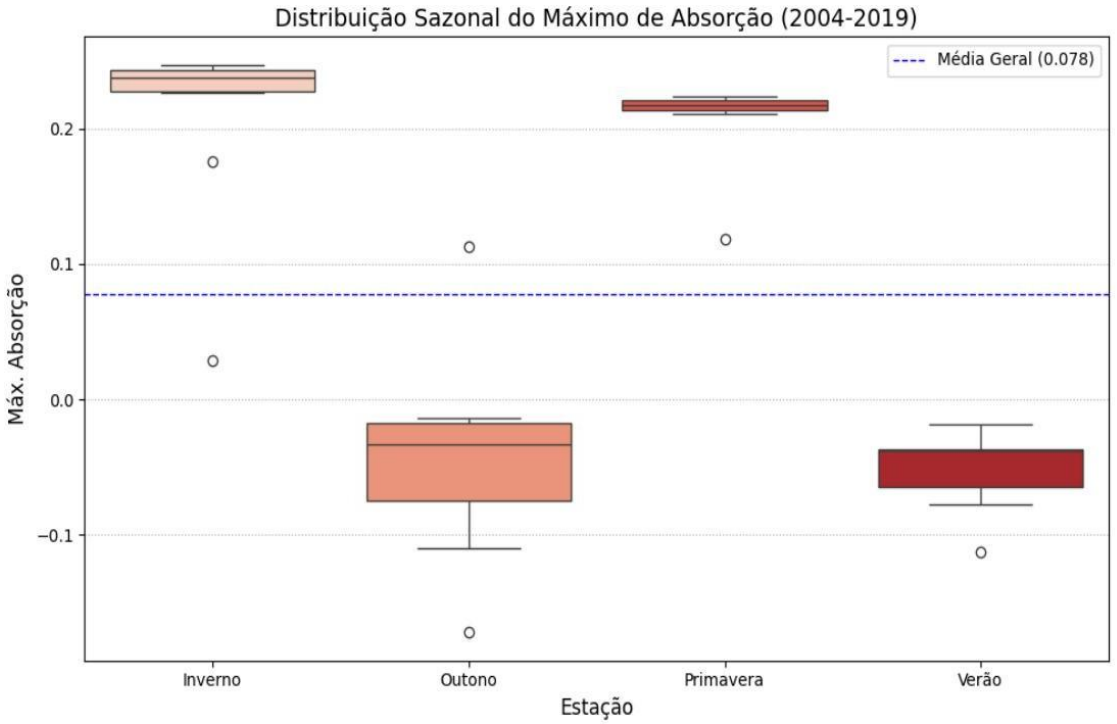
Vale investigar as componentes de velocidade do vento na horizontal para esclarecer essa interação da parcela com o ambiente atmosférico, tornando-o o único processo reversível. Dado isso, a absortividade mínima ocorre no dia 01/04/2013 e seu valor é -0,28; nota-se que este mínimo se assemelha ao período de transição de estação, por isso a componente absortividade tende a ser inibida (modulação) para

favorecer outros processos atmosféricos, como, por exemplo, a extinção de fluxos de aerossóis, que, por sua vez, é um comportamento da localidade de Petrolina.

> (NUNES, 1998, p. 72) A qualidade do ar em Petrolina-PE é pertinente às atividades antrópicas, queimada de biomassa ou resíduo industrial que geram emissões atmosféricas, e as características da vegetação seca e arbustiva serem possivelmente inflamáveis, a topografia, e condições meteorológicas podem ditar se o ambiente é favorável ou não à dispersão dos poluentes atmosféricos.

Quando se trata de modelos atmosféricos, essa informação é útil por focar na sensibilidade e no ajuste do intervalo a medições de espalhamento frontal, comparando com o azimute positivamente próximo de 1, em que o intervalo situa-se entre 0,7º e 1,3º. Isso gera um impacto na representação dos dados e visa melhorias em torno das estimativas do aerossol óptico com o espalhamento.

Figura 5 – Boxplot da máxima absorção por estação (2004-2019)



Fonte: AERONET

Figura 5: Boxplot (absortividade máxima).

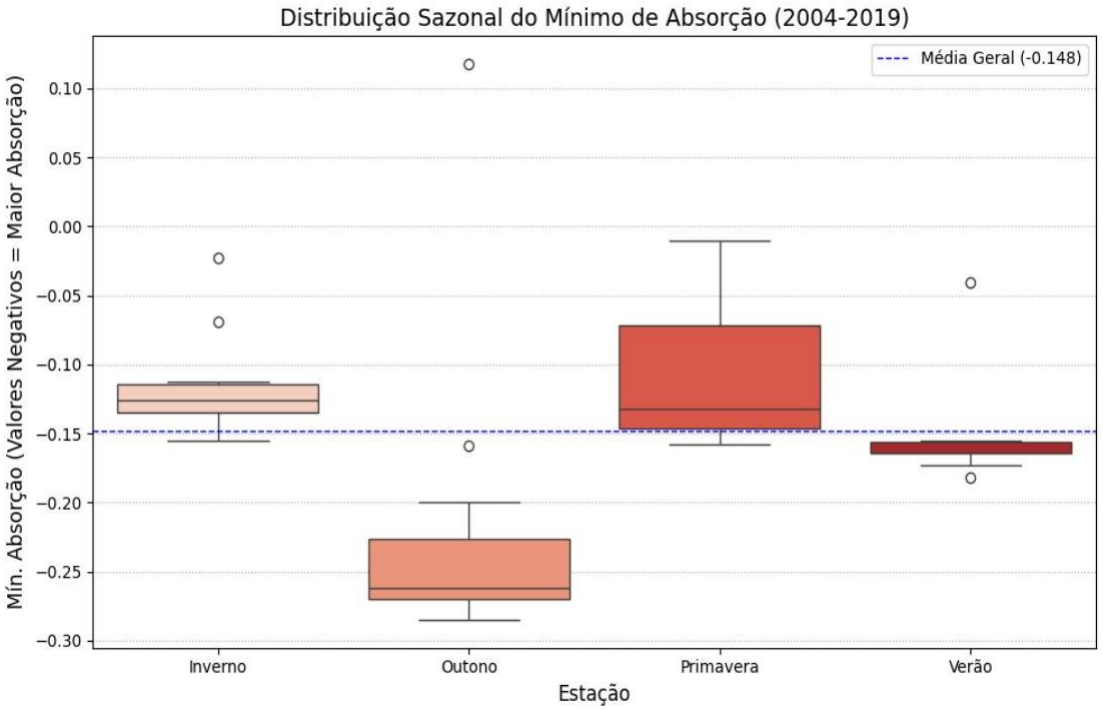
Observam-se na figura 5 os valores máximos de absorção ocorrendo em 2007 durante o inverno; esse valor está acima da média do trimestre em estudo, o que indica que, ao analisarmos a radiação solar, a atmosfera próxima à superfície funciona como impulsionadora de um possível máximo de temperatura.

No outono de 2014, ocorre um máximo de absorção e esse valor é negativo (-0,014), assim como ocorre um comportamento similar negativamente no verão de

2004 (-0,018). Isso é explicado pelo fato de que, quando a parcela de material particulado na atmosfera é atravessada por um feixe de irradiância solar, a energia contida no processo diminui; ou seja, há uma tendência a emitir mais energia em sistemas isolados do que a própria parcela possuir características absorvedoras na atmosfera, onde foram registrados ambos os extremos micrometeorológicos com altas temperaturas.

Outro máximo de absorção ocorre na primavera de 2008 e seu valor é 0,224. A atmosfera comporta-se como um sistema de armazenamento energético vivo, retendo o aquecimento e facilitando os processos de absorção.

Figura 6 – Boxplot da absorção negativa por estação (2004-2019) com média geral -0,148.



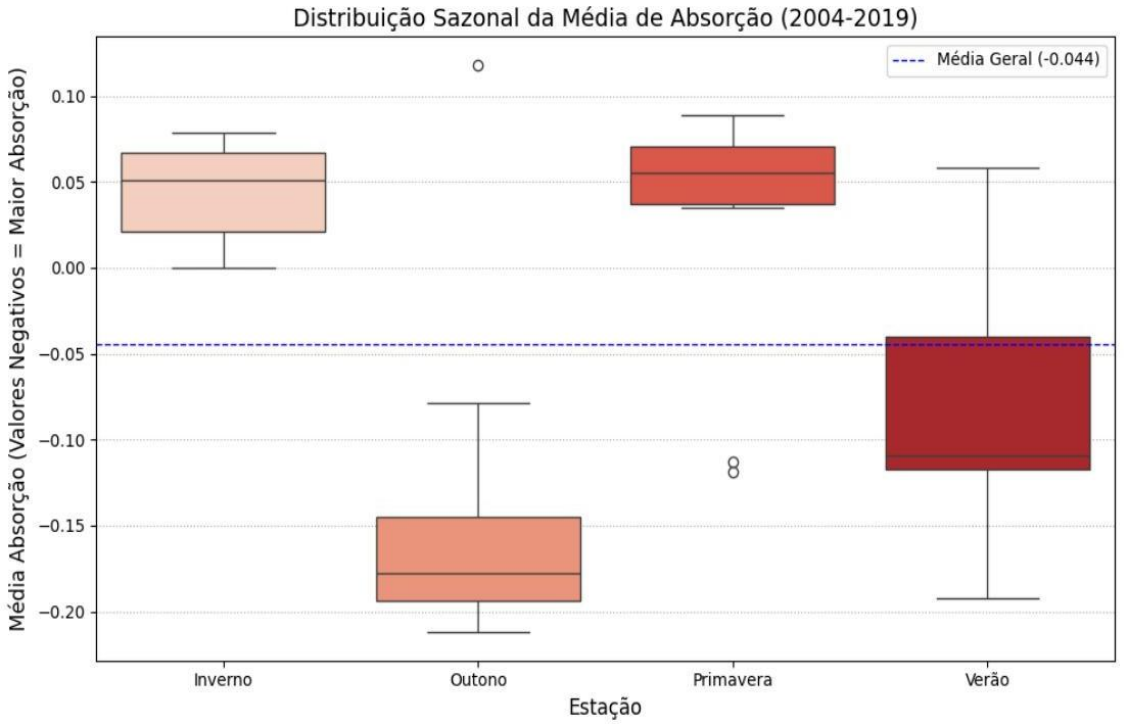
Fonte: AERONET.

Figura 6: Boxplot (absortividade mínima).

Os mínimos de absorção ocorrem de maneira similar na figura 6 pelo estudo do sinal negativo: no inverno de 2019 é -0,155 e durante o outono de 2013 é de - 0,285. Houve retomada parcial das chuvas, o seu valor respectivo é -0,149 e no verão o seu valor é de -0,182; contudo, as chuvas foram acima da média e isso representou o contraste, marcando o início da recuperação hídrica. Esse comportamento é justificado quando as partículas de material particulado passam pelo processo de absorção

ao qual um feixe de luz incidente emite, e na localidade Petrolina a energia em micro-escala tende a diminuir.

Figura 7 – Boxplot da absorção sazonal (inverno, outono, primavera, verão) 2004-2019.



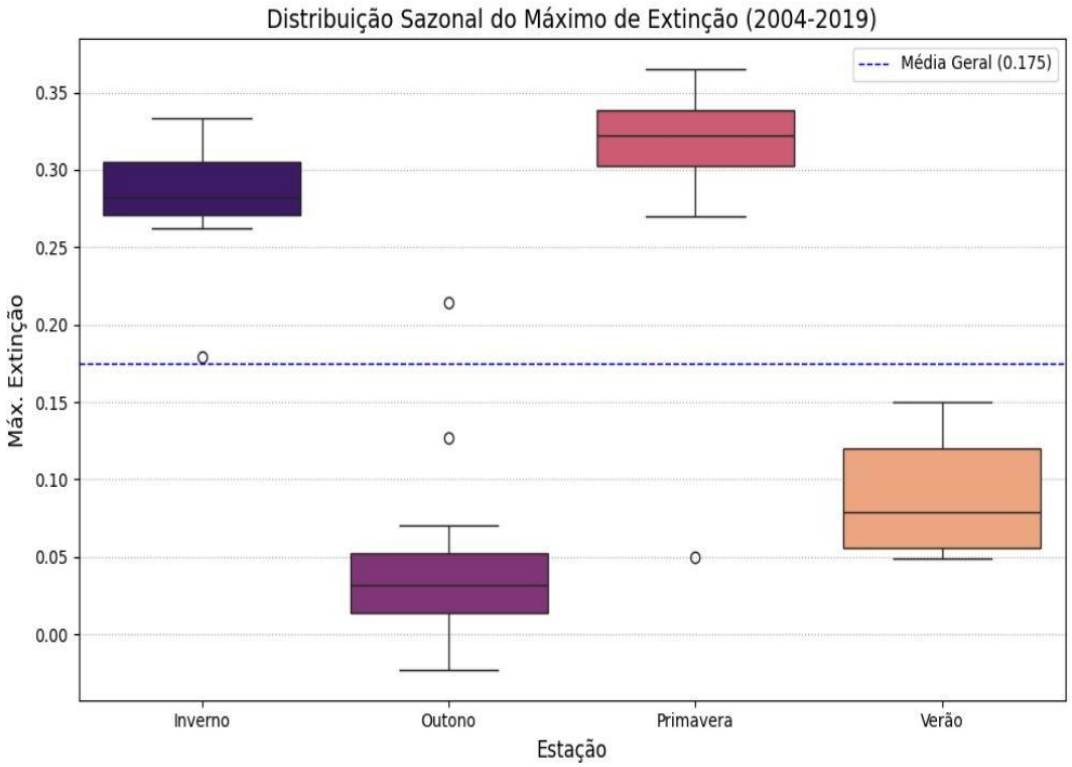
Fonte: AERONET.

Figura 7: Boxplot (absortividade média).

Pelo estudo do sinal, a absortividade média assemelha-se à configuração dos dados de máxima absortividade, porém a estimativa reduz a intensidade da variável na figura 7. O valor médio do inverno e da primavera, em termos de aproximação, são praticamente semelhantes (0,057 e 0,059 respectivamente); isso significa que houve pouca variação na composição atmosférica, ou ainda podemos verificar a estabilidade quanto aos padrões micrometeorológicos tendenciados a menor variação na temperatura e umidade específica. A temperatura média para o inverno manteve-se em 22ºC ao longo da série de dados e comprova menor variabilidade; ainda podemos falar da maior frequência da temperatura do ar em torno de 24ºC durante a primavera, o que comprova a menor variabilidade em torno do valor médio. Para a umidade específica, vemos a variação em torno de 0,013 kg/kg no inverno e, na primavera, o mesmo valor, 0,013 kg/kg, justificando assim a mínima variabilidade durante a série de dados em estudo.

Pelo estudo do sinal, o outono e o verão são negativos, com valores de sazonalidade média absortiva de -0,184 e -0,112, respectivamente. Os processos de absorção aos quais um feixe de luz incidente emite e, na localidade Petrolina, a energia em microescala tende à diminuição, justificam, portanto, o comportamento médio.

Figura 8 – Boxplot da distribuição sazonal do máximo de extinção (2004-2019)



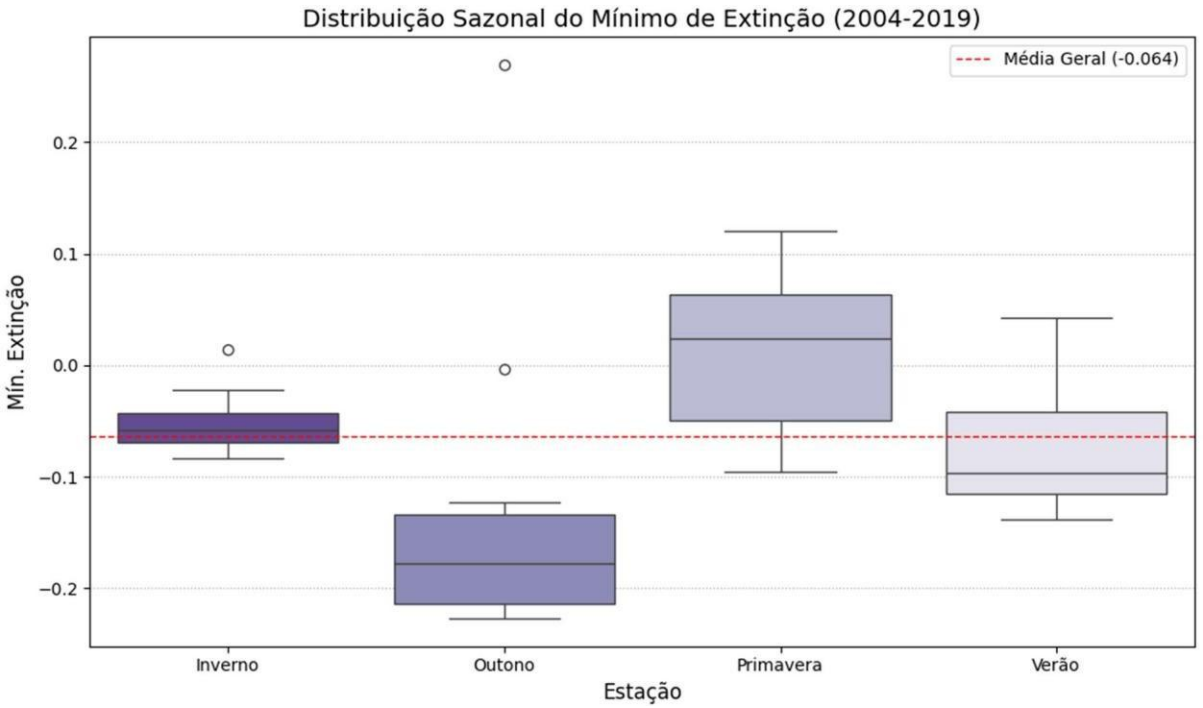
Fonte: AERONET.

Figura 8: Boxplot (extinção máxima).

Durante a primavera de 2012, a extinção máxima observacional foi de 0,365. É explícito que esse momento representa um máximo geral da série; durante o período deste estudo, isso significa haver maiores quantidades de partículas em suspensão na atmosfera, sendo, assim na figura 8, há um fator redutor dos índices de luz que chegam à superfície, ou seja, as condições meteorológicas são um fator atenuador.

Houve ressalva quanto a esta variável durante o outono de 2017, pois, pelo estudo do sinal, trata-se de um valor atípico de -0,023. No outono de 2017, houve a recuperação parcial das chuvas e o período estava sob condições em que a ocorrência de precipitação foi dentro da normalidade, mas não reverteu o déficit hídrico devido à persistência da seca histórica.

Figura 9 – Boxplot da extinção mínima por estação (2004-2019).

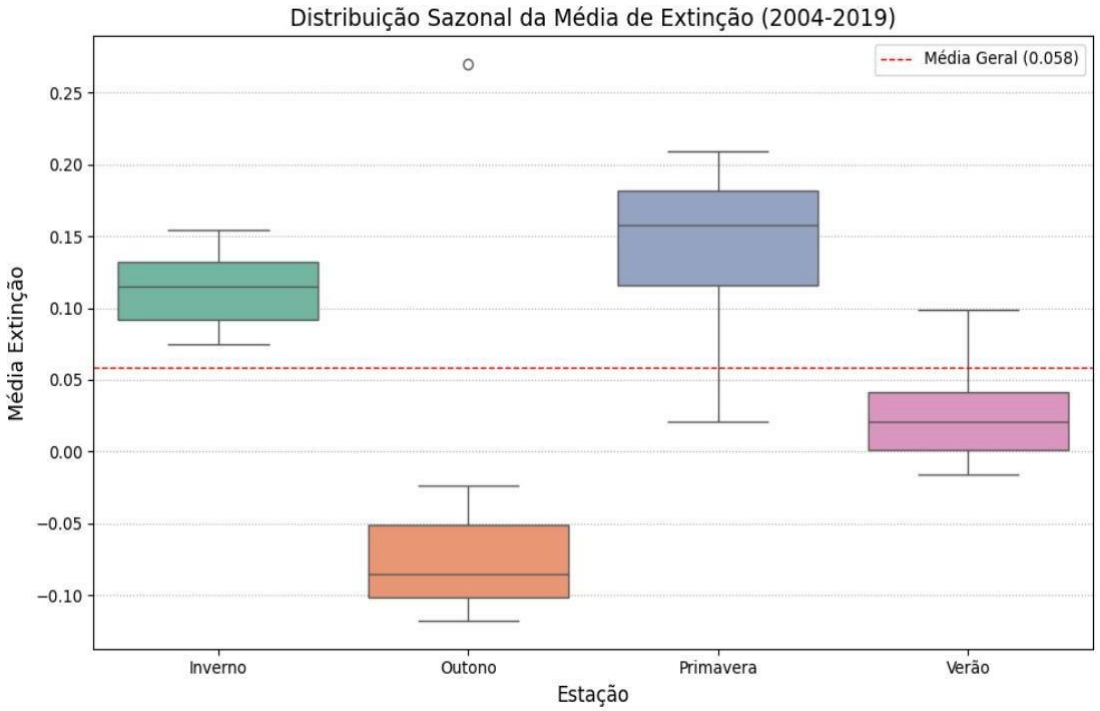


Fonte: AERONET.

Figura 9: Boxplot (extinção mínima).

Analisando a figura 9, o período em que a atmosfera de Petrolina se configura mais limpa é no outono de 2013, e seu valor é -0,227, o que significa haver menor quantitativo da concentração de fluxos de aerossóis na atmosfera; por definição, há perda de energia da radiação ao atravessar a coluna atmosférica até próximo à superfície. Outro comportamento similar ocorre durante o verão de 2007, com -0,115. O contexto inverso ocorre durante o inverno e a primavera, com -0,083 (2019) e -0,095 (2016), porém com maior indicativo de atenuação. Todavia, a temática indica um favorecimento da transmitância da atmosfera, na qual há uma atenuação da radiação em superfície quando comparados o outono e o verão com a primavera ao longo da série, e esta, por sua vez, teve a maior frequência de valores positivos. A primavera de 2016 teve padrão de tendência de chuvas favoráveis.

Figura 10 – Boxplot da média de extinção por estação (2004-2019)



Fonte: AERONET.

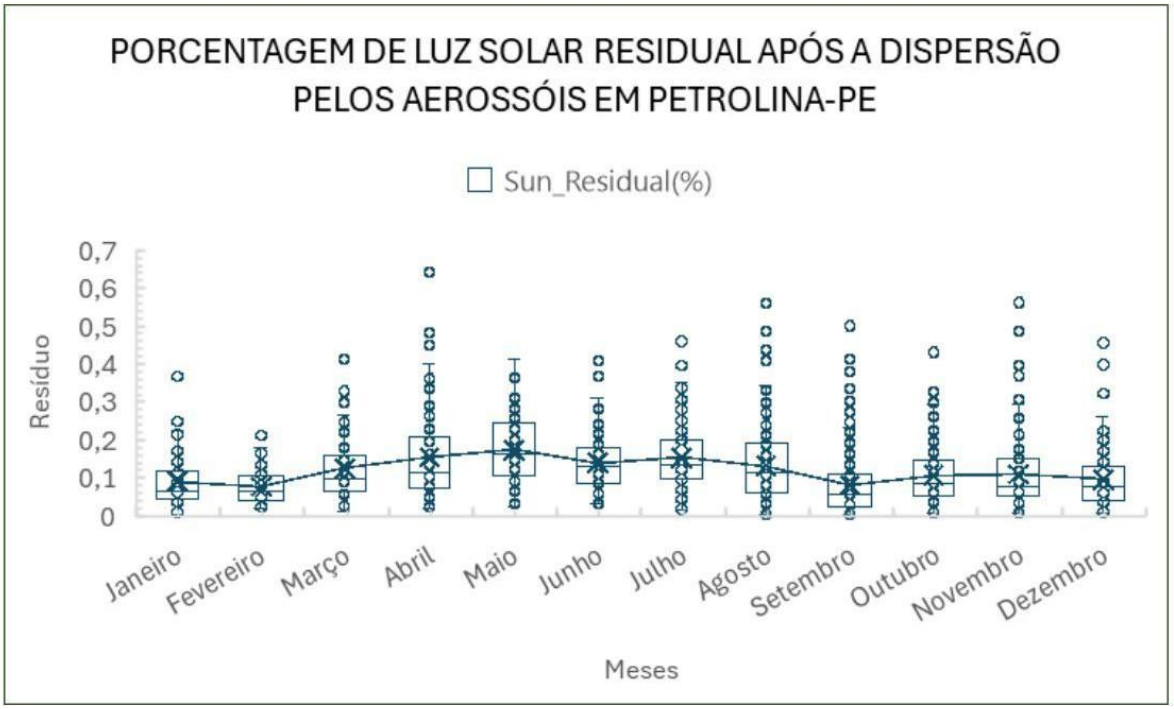
Figura 10: Boxplot (extinção média).

Os valores médios de extinção espectral foram observados na figura 10 e, durante a primavera, ocorre o máximo médio de 0,167. Pelo estudo médio do sinal, há tendência a um comportamento positivo ao longo das estações (inverno, primavera e verão). Outro dado de inversão ocorre durante o outono, mantendo o padrão negativo ao longo dos anos, o que indica maior atenuação da variável conforme a definição da Lei de Beer.

5.1.2 Resíduo atmosférico em Petrolina

Quanto ao princípio fundamental teórico acerca do resíduo atmosférico, inicialmente o feixe de irradiância solar que atravessa a abóbada celeste da Terra sofre interações com os elementos de rugosidade em superfície; porém, cada corpo celeste emite energia e, através desse processo, sofre reflexão e espalhamento, alterando, assim, o tempo de suspensão de partículas no ar. Tal fato é pertinente à taxa de armazenamento atmosférico e sua sazonalidade ao longo do tempo. Faz-se imperiosa a análise da porcentagem residual de luz após a dispersão de fluxos de aerossóis ópticos em Petrolina e o mecanismo de armazenamento de AOD na atmosfera.

Figura 11 – Boxplot da porcentagem de luz solar residual após dispersão por mês em Petrolina-PE



Fonte: AERONET.

Figura 11: Resíduo atmosférico em Petrolina-PE, a partir dos dados do AERONET.

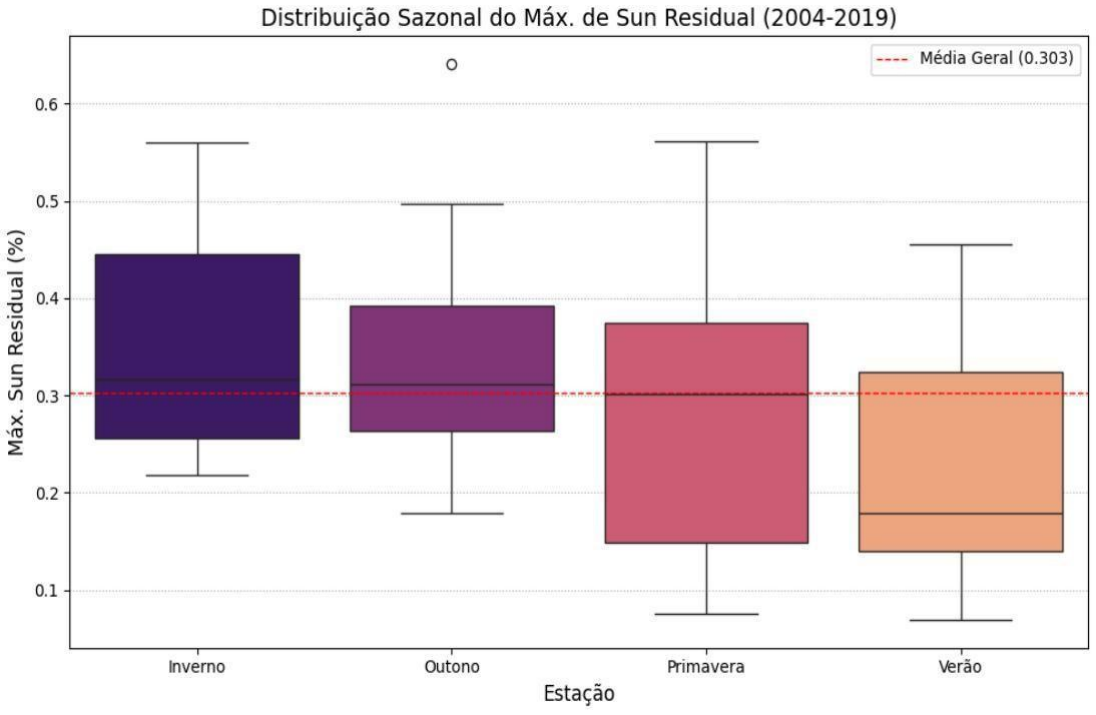
A Figura 11 descreve suavemente a variação da concentração residual atmosférica percentual; o eixo y indica o resíduo e sua expressividade ao longo do tempo no eixo x, causados após a passagem de luz e efeitos de dispersão térmica. O gráfico mostra o valor residual em porcentagem de luz solar após a dispersão por fluxos de aerossóis em Petrolina-PE, no Nordeste do Brasil, ao longo do ano. A porcentagem de luz solar residual indica a quantidade de luz solar incidente na superfície da Terra

após passar pela atmosfera, composta por vários gases e partículas de fluxos de aerossóis de queimadas.

A presença de fluxos de aerossóis na atmosfera pode minimizar o quantitativo de luz solar que chega à superfície por poder absorver e espalhar a luz, mostrando que a porcentagem de luz solar residual varia significativamente ao longo do ano, o que contribui para a eficiência nos processos de extinção de fluxos de aerossóis. As maiores porcentagens de luz solar residual são observadas nos meses de julho a setembro, quando a estação seca é considerada mais intensa e há menores quantidades de fluxos de aerossóis na atmosfera. As menores porcentagens residuais são observadas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, com a ressalva de que há também um comportamento mínimo em setembro, quando a estação chuvosa é mais intensa e há mais fluxos de aerossóis presentes na atmosfera.

A representação da presença de fluxos de aerossóis na atmosfera pode ter um impacto na quantidade de luz solar que chega à superfície da Terra, mostrando assim o comportamento cíclico do balanço de radiação solar e terrestre e sua tendência de armazenamento energético e de partículas depois do processo de deposição. Dado o exposto, a luz solar residual também pode ser afetada por outros fatores, como a latitude, a altitude e a cobertura de nuvens.

Figura 12 – Boxplot da variação sazonal do máximo Sun Residual (%) em Petrolina-PE

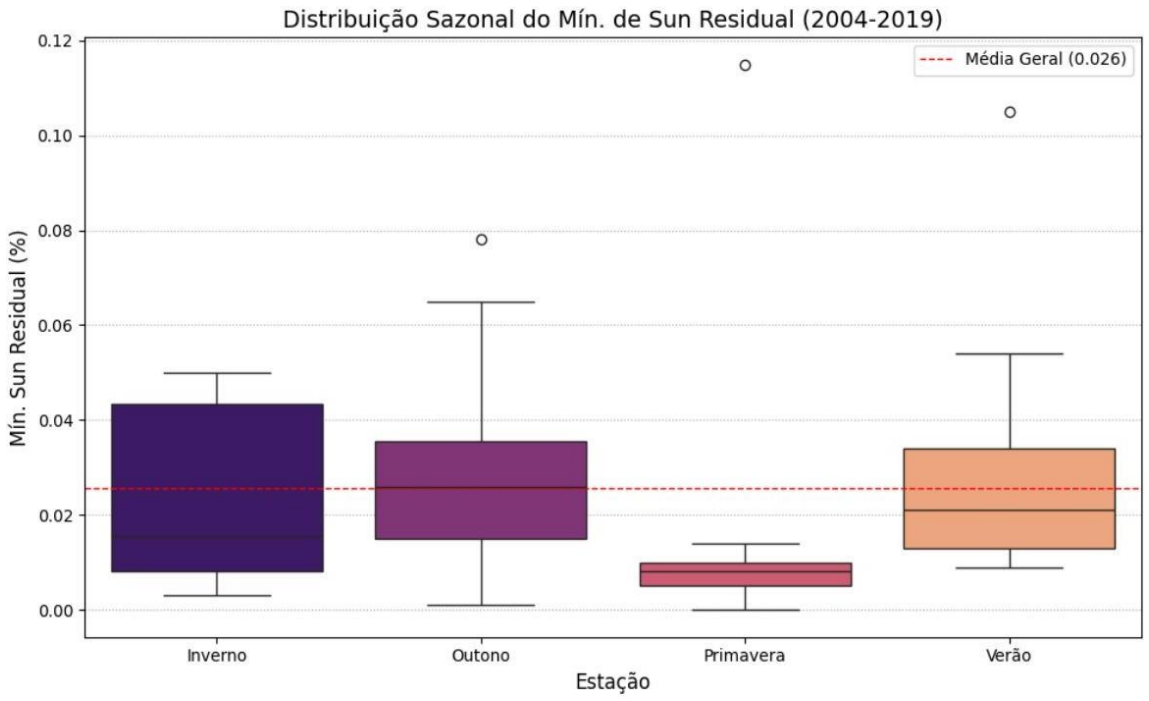


Fonte: AERONET.

Figura 12: Boxplot (máximo residual solar).

Assim como os dados de extinção média na figura 12, observa-se a maior atenuação da radiação solar residual durante o outono, 0,641% em 2015. Outro fator elementar é buscar entender o padrão sazonal que afeta a quantidade de luz que chega à superfície. Durante o inverno, os máximos de radiação solar residual em Petrolina tendem a ser maiores do que na primavera; contudo, quando observamos os dados máximos da série em 2015, a primavera foi de 0,562% e o inverno de 0,560%. Somente em 2015 houve esse padrão anômalo de atenuação que, por sua vez, teve continuação do agravamento do déficit hídrico. Durante o verão de 2015, observa-se outro máximo, cujo valor é 0,455%. Configuram-se dias mais longos, porém, na série dos dados, em linhas gerais, esse comportamento apresenta uma menor atenuação devido a fatores locais quando comparado com as demais estações. Vale salientar que somente em 2007 esse comportamento muda, sendo o máximo geral de 0,324%, tornando-se um comportamento particular da localidade de Petrolina, embora o semiárido tenha tido chuvas abaixo da média.

Figura 13 – Boxplot da distribuição sazonal do mínimo de Sun residual (2004-2019)

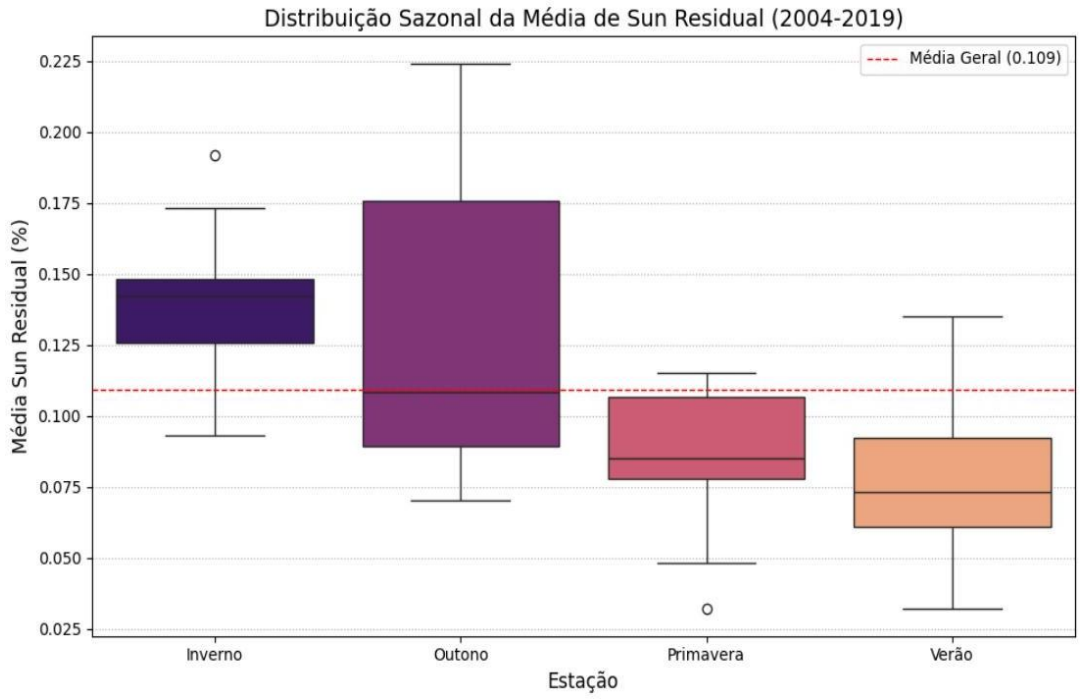


Fonte: AERONET.

Figura 13: Boxplot (mínimo residual solar).

Já outro fator anômalo padrão encontrado em Petrolina quanto ao mínimo geral de radiação solar residual na figura 13 ocorreu no outono de 2015, 0,001%. Na primavera, o valor assemelha-se, sendo de aproximadamente 0,002% em 2012, ocorrendo, assim, um padrão micrometeorológico peculiar com menor variabilidade sazonal e possível transição gradual entre as estações ou, ainda, menor amplitude térmica quando comparado com o verão de 2018, onde as chuvas foram acima da média (0,009%), e o inverno de 2013 (0,003%), quando ocorreu no semiárido nordestino um déficit hídrico severo. Pode-se salientar que os valores mínimos de radiação solar residual são devidos ao quantitativo de luz que chega à superfície terrestre devido a, por exemplo, cobertura de nuvens, fatores micrometeorológicos e também partículas em suspensão na atmosfera, que diminuem a passagem de luz.

Figura 14 – Boxplot da média do Sun residual por estação (inverno, outono, primavera, verão).



Fonte: AERONET.

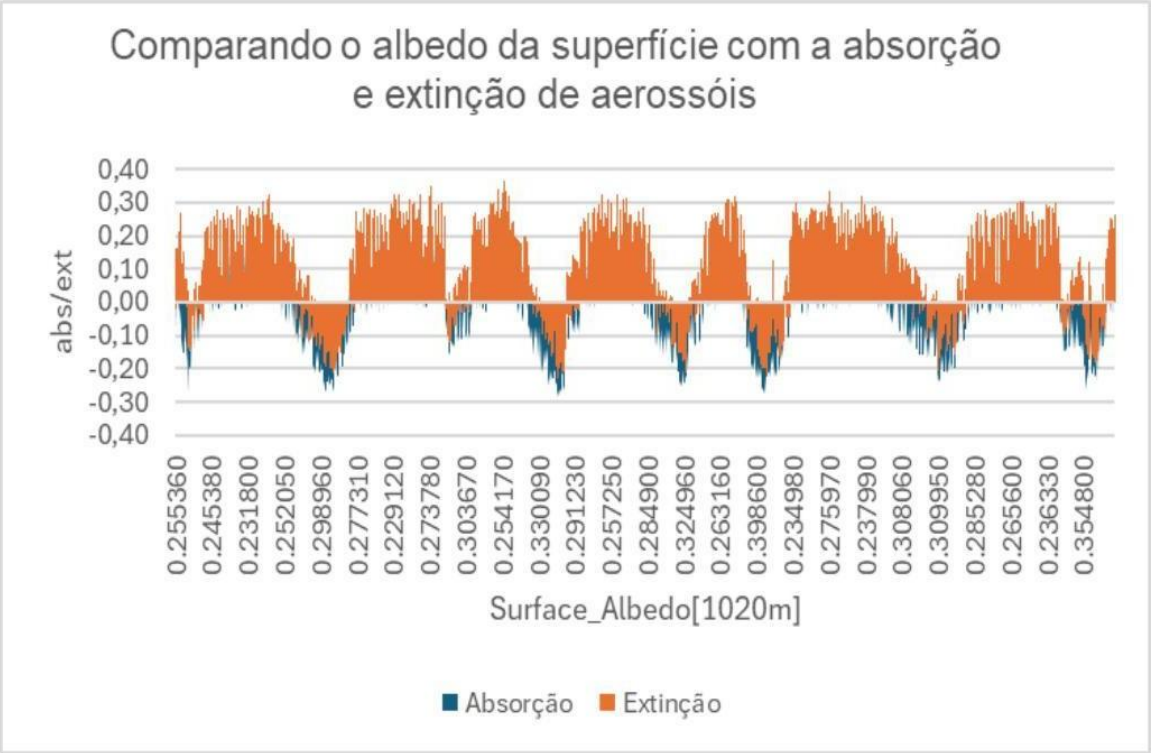
Figura 14: Boxplot (média residual solar).

Em média na figura 14, durante o inverno, há a maior variabilidade de luz solar residual (0,141%), assim como durante o outono (0,131%). Isso é explicado por uma possível tendência de alternância das massas de ar, que pode se atenuar devido a particularidades da estação chuvosa de Petrolina. Já na primavera e no verão, seus valores são, respectivamente, 0,093% e 0,095%. As variações são menos abruptas

entre as transições de estações, influenciando a menor amplitude da quantidade de energia incidente ao longo do ano, com características específicas do local.

5.1.3 Albedo superficial comparado com os processos de absorção e extinção de fluxos de aerossóis em Petrolina.

Figura 15 – comparativo entre absorção e extinção em função do albedo de superfície



Fonte: AERONET.

Figura 15: Albedo da superfície comparado aos processos de absorção e extinção, a partir dos dados do AERONET.

O efeito do uso e cobertura do solo interfere no balanço de radiação, assim como contribui para os processos de reflexão e espalhamento ao nível da partícula. A Figura 15 mostra a comparação entre o albedo da superfície e a absorção e extinção de fluxos de aerossóis em função do comprimento de onda da radiação solar. O albedo da superfície é a fração da radiação solar direta refletida do solo em direção às nuvens, com possibilidade de atingir camadas mais altas da atmosfera, enquanto a absorção e a extinção de fluxos de aerossóis são processos que tendem a reduzir a quantidade de radiação solar que chega à superfície; de fato, a atmosfera funciona como um filtro de luz e tem a propriedade de equilibrar a sensação térmica.

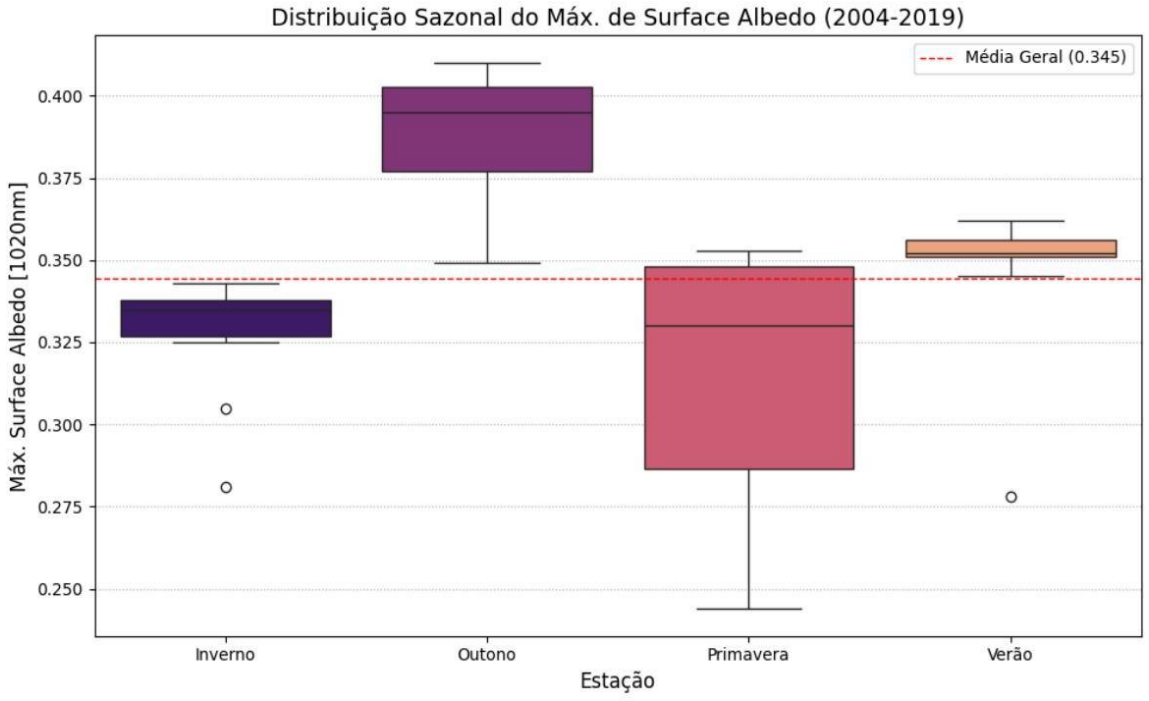
A Figura 15 mostra que o albedo da superfície é relativamente alto em comprimentos de onda curtos, ou seja, na região do espectro visível, e diminui em comprimentos de onda longos, ou seja, na região do infravermelho. Isso ocorre porque os

materiais da superfície, como a vegetação e o solo, refletem mais radiação solar em comprimentos de onda curtos do que em comprimentos de onda longos.

A absorção e a extinção de fluxos de aerossóis também são maiores em comprimentos de onda curtos do que em comprimentos de onda longos. No entanto, ao longo da série de dados, vemos que os valores de extinção são maiores do que os de absorção, comparando com o albedo. Isso ocorre porque os fluxos de aerossóis absorvem e dispersam mais radiação solar em comprimentos de onda curtos do que em comprimentos de onda longos.

A Figura 15 combinada mostra que a absorção e a extinção de fluxos de aerossóis podem ter um impacto significativo no albedo da superfície. Exemplificando no contexto de parâmetros de refletância em comprimentos de onda próximos a 0,25 micrômetros, a absortividade e a extinção de fluxos de aerossóis reduzem o albedo da superfície em cerca de 0,1. A absorção e a extinção de fluxos de aerossóis podem afetar a temperatura da superfície, a formação de nuvens e a precipitação. Contudo, esse estudo é de grande importância para a Meteorologia por visar entender o cenário atmosférico e sua sazonalidade; com isso, torna-se fundamental para compreender a variação micrometeorológica.

Figura 16 – Boxplot da distribuição sazonal do albedo máximo da superfície (2004-2019) por estação

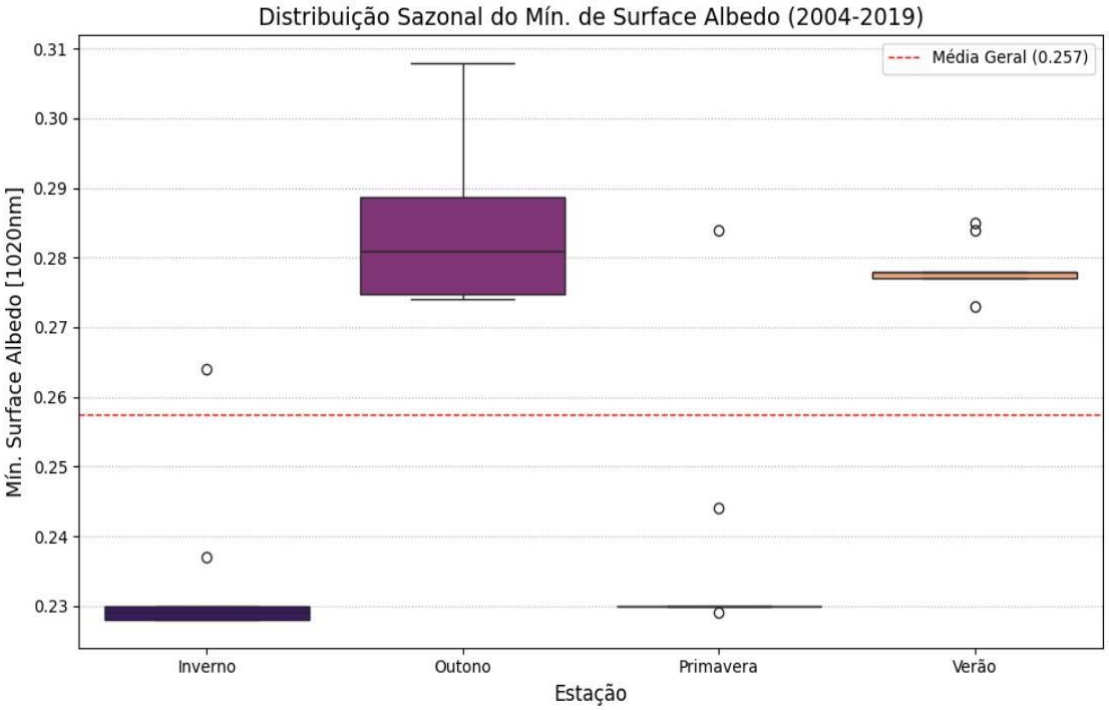


Fonte: AERONET.

Figura 16: Boxplot (máximo albedo de superfície 1020 nm).

O máximo do albedo a 1020 nm em Petrolina, na superfície quando olhamos para figura 16, durante o outono de 2015, corresponde a 0,410, e o mês de outubro mantém esse máximo de refletividade durante todo o período de estudo. Existe outro comportamento máximo durante o verão de 2007 e o seu valor é 0,362; o maior quantitativo de dias de céu claro potencializou o solo do NEB a refletir mais. Os máximos de refletividade funcionam como agentes reguladores de temperatura. Dado isso, comparando as estações, o inverno (0,343) de 2019 e a primavera (0,352) de 2007 compõem o período de menor refletividade devido à interação com o sistema do balanço energético, ou ainda, constituem um mecanismo de retroalimentação para os períodos de seca.

Figura 17 – Boxplot da mínima albedo de superfície a 1020 nm por estação (2004-2019)



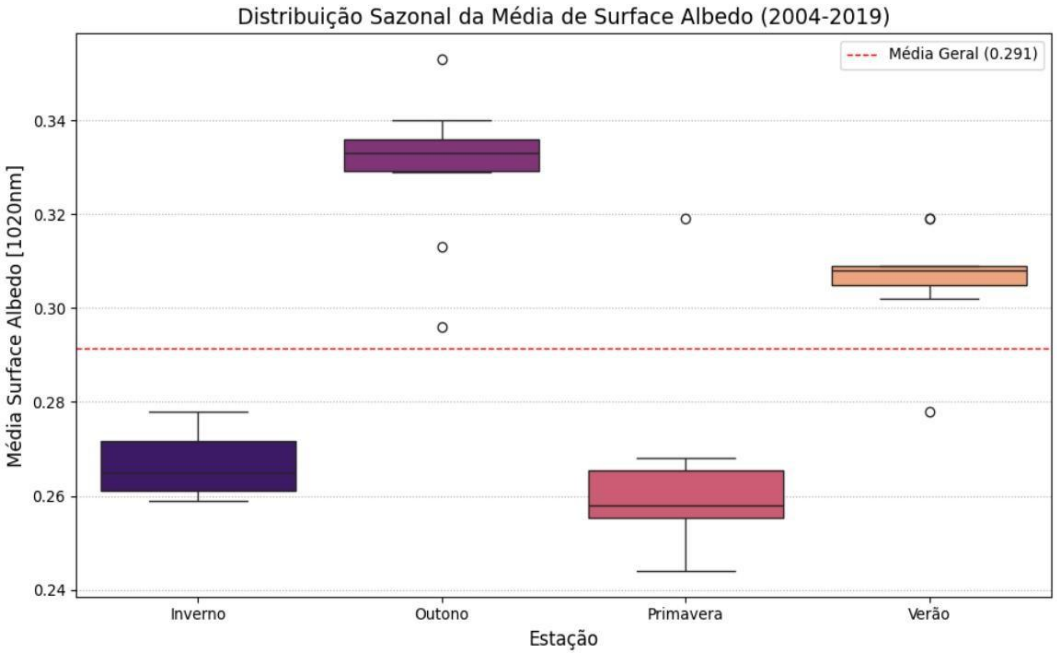
Fonte: AERONET.

Figura 17: Boxplot (Mínimo albedo de superfície em 1020 nm).

O verão e o outono são os períodos de maior refletividade; porém, ao avaliar os dados mínimos de albedo de superfície em 1020 nm na figura 17, observa-se isso mais expressivamente no outono, onde se nota a maior variabilidade energética e interferência devido à formação de sistemas com menores profundidades verticais (nebulosidade). Durante o outono (0,274) de 2014 e o verão de 2004 (0,273), houve chuvas acima da média. Por Petrolina estar na região semiárida, o solo tende a ficar seco.

Dado isso, o inverno e a primavera apresentam um albedo similar: no inverno (0,228) de 2013, passou-se por um período de seca severa e, na primavera (0,229) de 2008, houve influência do efeito de resfriamento da atmosfera; ainda assim, pode-se afirmar que os processos de evapotranspiração são mais evidentes.

Figura 18 – Boxplot da média do albedo de superfície em 1020 nm por estação (2004-2019).



Fonte: AERONET.

Figura 18: Boxplot (média do albedo de superfície em 1020 nm).

Em média, o albedo de superfície em Petrolina na figura 18, durante o inverno é 0,265. Em outros termos, pode-se inferir que o solo absorve mais radiação solar, também por apresentar menores quantitativos de cobertura vegetal. No outono, o albedo de superfície é de 0,332; contudo, esse valor médio é alto por causa da refletividade máxima durante esta estação. Assim como no inverno, a primavera (0,261) exprime, em média, um valor baixo, caracterizado pelo início do crescimento da vegetação. Já o verão (0,307) é o período de máxima refletividade, ou seja, máximo de radiação solar.

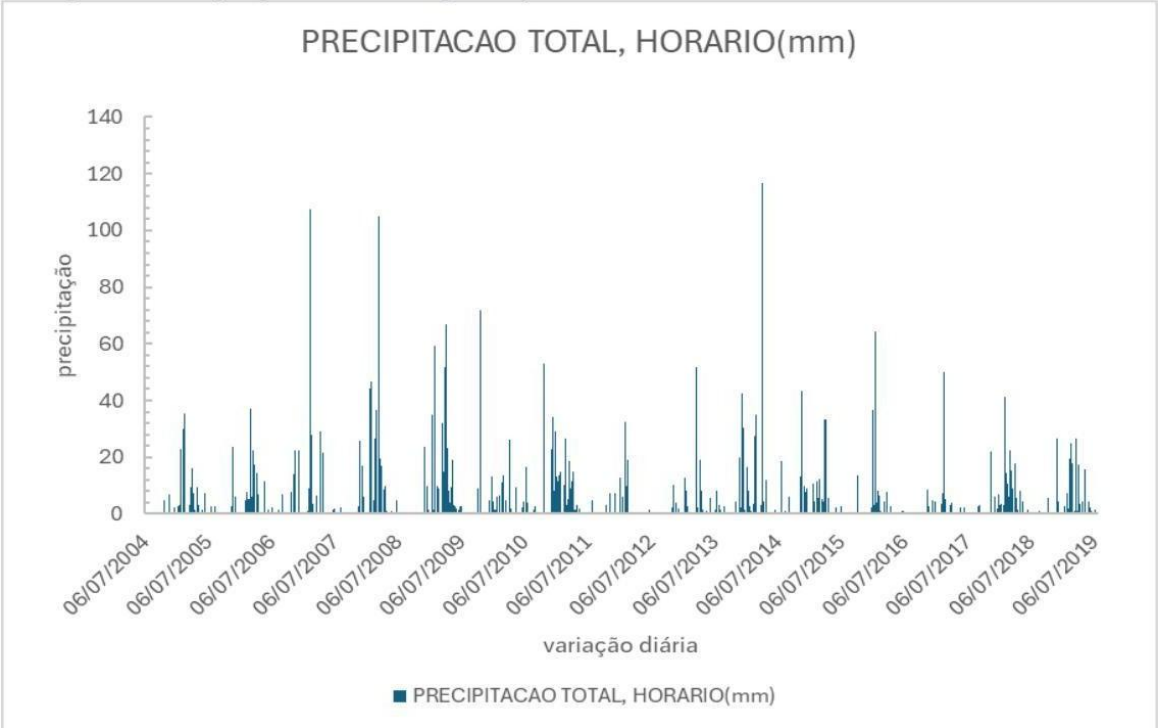
5.2 Cenário atmosférico para Petrolina com os dados do INMET

Os fenômenos atmosféricos afetam a troposfera, cuja variação de temperatura é denominada de gradiente adiabático (seco ou úmido). As variáveis meteorológicas de superfície (precipitação, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade específica) são necessárias para monitorar a qualidade do ar em Petrolina-PE e investigar como será o padrão das concentrações de poluentes.

Em micrometeorologia, os poluentes têm uma trajetória desde o oceano Atlântico Sul. As partículas de sais expelidas no ar, a partir das ondas, adentram a costa litorânea. Parte desses sais ascende e outra parte é depositada no solo. Porém, essa trajetória é perturbada ou aquecida pelo escoamento do vento e pela radiação solar e, com isso, sofre alterações em sua estrutura por reações químicas, atrito ou orogra-fia. Considera-se que as partículas de poeira e fuligem também sofrem o mesmo as-pecto físico no âmbito de transporte e deposição. Ainda assim, a trajetória é induzida pelo comportamento do escoamento das trajetórias das células de ar.

5.2.1 Precipitação horária em Petrolina

Figura 19 – Precipitação total horária do INMET da precipitação total horária por variação diária (mm) entre 2004 e 2019.



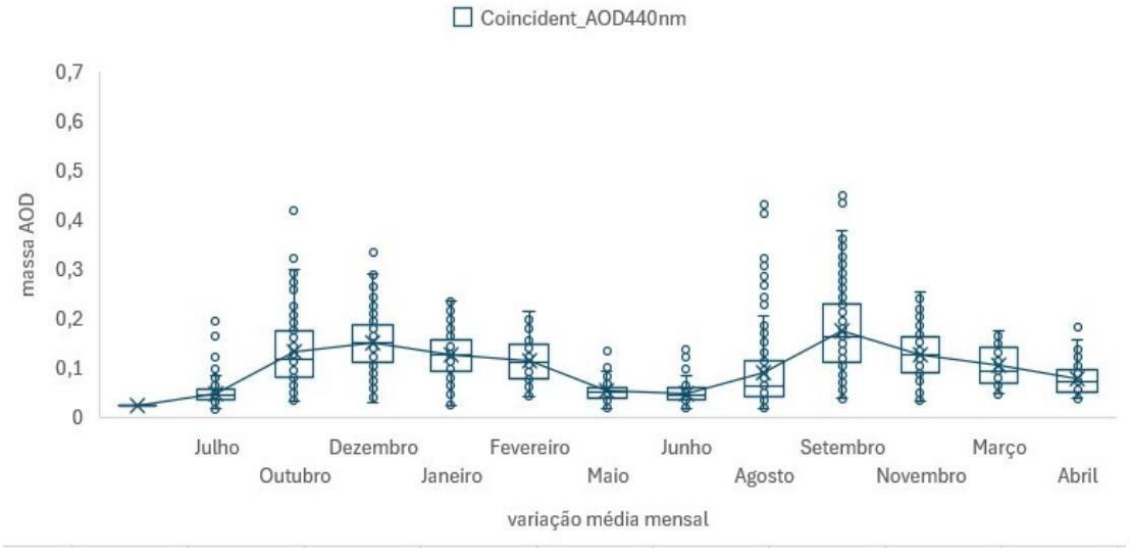
Fonte: INMET.

No gráfico da variável precipitação que é referida na figura 19, observam-se os principais valores entre os anos de 2007 e 2009, enquanto os valores observacionais mínimos de precipitação se concentram nos anos de 2004 a 2005, bem como de 2016 a 2017. Os picos de precipitação representam indícios de eventos extremos precipitáveis influenciados pelo sistema de convergência de massa em baixos níveis sobre a região Nordeste do Brasil; na região da cidade de Petrolina, a atuação dos sistemas atmosféricos é um fator favorável para a ocorrência de chuvas. Ainda é possível relacionar a maior frequência de chuva durante 2007 e 2009 com o alto fluxo de aerossóis. Quando os valores de fluxos de aerossóis são mínimos, correspondem a valores mínimos de precipitação. No entanto, ao relacionar os dados de fluxos de aerossóis grossos com a faixa em que ocorrem os máximos e mínimos de absorção e extinção dos fluxos de partículas, nota-se uma concomitância atrelada à possível diminuição do fluxo de aerossóis. Os eventos de chuva podem resultar na redução de absorção e extinção e, ainda, podem afetar a ascensão e deposição de partículas através dos processos convectivos na atmosfera. Em termos gerais, a água da chuva pode carregar as partículas por meio da gravidade para a superfície. De fevereiro a maio, com

destaque para março e abril, ocorre o período de atuação do sistema semipermanente ZCIT na região nordestina, propiciando os principais eventos de chuva. Já nos meses em que este não está presente, há redução de chuvas e, por consequência, maior incidência de fluxos de aerossóis na atmosfera.

Ao analisar a profundidade óptica do aerossol em relação ao ângulo de espalhamento para Petrolina-PE, no período de 2004 a 2019, é possível realizar uma comparação com o gráfico inferior, que mostra a precipitação total horária em mm no mesmo intervalo. Pelos gráficos, é notório que há uma correlação entre o aumento dos fluxos de aerossóis e a diminuição da precipitação. Isso ocorre porque fluxos de aerossóis, como poeira e fumaça, funcionam como agentes bloqueadores da radiação solar, reduzindo a quantidade de energia que chega à superfície; consequentemente, haverá estabilidade termodinâmica no sistema de pequena escala, diminuindo a evaporação e a formação de nuvens. Os fluxos de aerossóis podem variar significativamente ao longo do ano, especialmente nos períodos secos. Já a precipitação é mais evidente nos meses de verão, quando a umidade relativa do ar é maior e a temperatura é mais alta.

Figura 20 – Boxplots da variação média mensal da massa AOD por mês



Fonte: AERONET.

Figura 20: Massa óptica coincidente 440nm (AERONET).

Foi necessária a análise da espessura óptica dos fluxos de aerossóis com os dados de precipitação em Petrolina na figura 20, onde os períodos de maior concentração milimétrica ocorrem nos meses de abril e novembro, com picos significativos.

Ainda averiguando, os meses de julho, agosto e setembro apresentam maiores valores de fluxos de aerossóis, correspondendo aos meses de menor precipitação. Já os meses de junho e julho apresentam menores índices de chuva. Os meses de abril e novembro atingem os máximos de volume pluviométrico, o que equivale aos menores registros de fluxos de aerossóis. A chuva funciona como um agente de limpeza na atmosfera, removendo o material particulado. Os períodos secos, com baixa umidade do ar, favorecem a formação e acumulação de fluxos de aerossóis grossos em suspensão na atmosfera.

Pode-se observar que a porcentagem de luz residual em Petrolina mostra uma tendência de aumento, com um pico em agosto, coincidindo com a maior taxa de armazenamento residual. Todavia, há grande variabilidade ao longo dos meses. Vale ressaltar também que julho dispõe de menores valores médios de luz solar, justamente por ser o período do inverno, sendo influenciado pela região de atuação da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical). Já ao se avaliar a precipitação diária, esta é maior quando coincide com a menor taxa de incidência luminosa.

DE SOUZA, Amaury et al. (2021) afirmam que o efeito semidireto é o mecanismo pelo qual os fluxos de aerossóis absorventes aquecem as nuvens com as quais se misturam. Ademais, as gotículas de água nas nuvens evaporam, fazendo com que a cobertura seja reduzida. A radiação solar atingirá a camada atmosférica sob as nuvens, tornando-a um aprisionador de energia, o que resultará em aumento da temperatura na baixa atmosfera. Haverá um aumento na estabilidade atmosférica sob a pluma de aerossol, o que pode atenuar a evaporação da superfície e os processos de convecção; logo, tenderá a uma diminuição na precipitação.

Da mesma forma, essa análise microfísica de nuvens aplicar-se-á a Petrolina, devido à maneira como a atmosfera busca o equilíbrio hidrostático e geostrófico. Petrolina, situada na região semiárida nordestina, é influenciada pela massa de ar polar durante o inverno, na qual é transportado ar frio e seco, e o equilíbrio geostrófico é mais evidenciado. Já no verão, a cidade é influenciada pela massa de ar equatorial, que traz ar quente e úmido, e o equilíbrio hidrostático é menos evidenciado devido à instabilidade atmosférica, favorecendo a formação de chuvas convectivas.

> PALÁCIOS et al. (2014, p. 179) afirmam: Percebe-se que os padrões de precipitação influenciam os valores da AOD, uma vez que quando há incidência de chuvas a atmosfera é limpa, reduzindo assim os valores de Profundidade Óptica. Devido à climatologia da região, a escassez de precipitação favorece o aumento do número de focos de queimadas, explicando os altos valores de AOD nos meses de agosto, setembro e outubro.

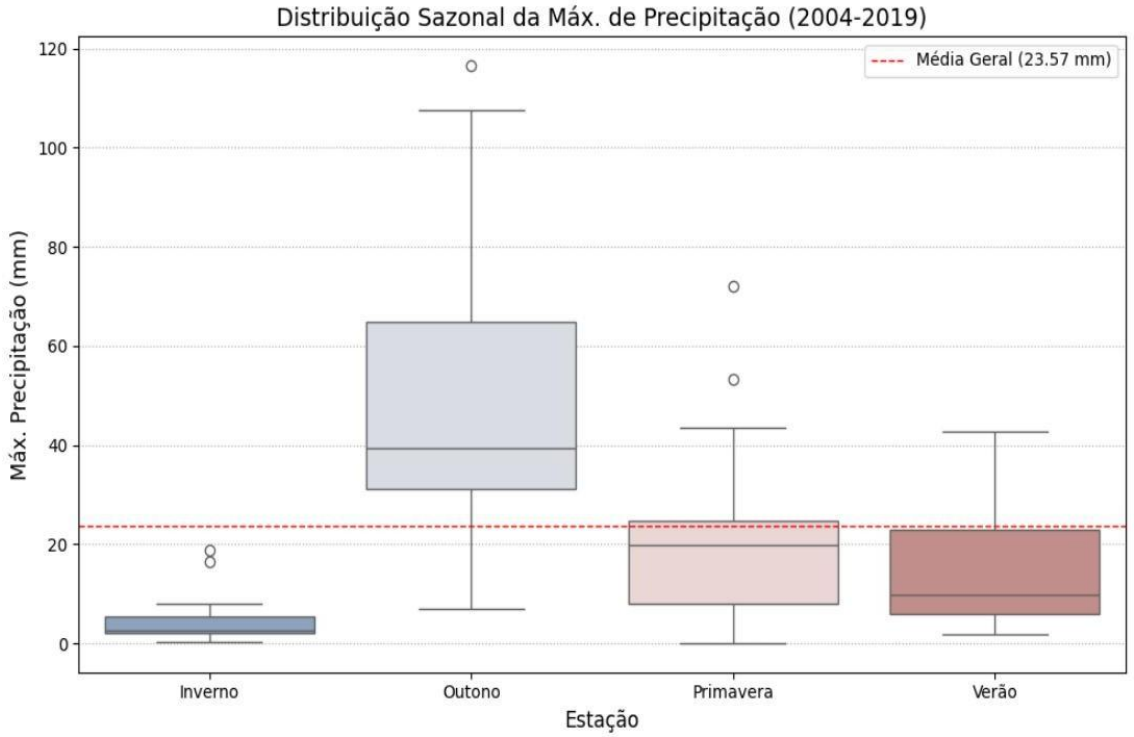
Em Petrolina-PE, os máximos de fluxos de aerossóis acontecem nos meses de julho, agosto e setembro; já no Cerrado mato-grossense (agosto, setembro e outubro), observa-se paridade por coincidir com máximos de ocorrência de fluxos de aerossóis grossos na atmosfera e, consequentemente, menores eventos de chuva; quando mínimos, o comportamento é inverso na presença de chuvas.

> PRADO et al. (2015, p. 6883) "A variabilidade sazonal média mensal da precipitação, AOD, número acumulado de focos de queima para o Mato Grosso no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2012. A região possui um ciclo anual de chuva marcante, com regime dividido por estação seca e úmida.

No contraste da análise da Amazônia Legal e da região semiárida do NEB (Nordeste Brasileiro), observa-se que ambas as áreas são influenciadas pela ZCIT, cada uma com um regime de chuvas distinto. Tal qual no MT, o período úmido possui chuvas abundantes e frequentes e alta umidade relativa do ar, enquanto no período seco as chuvas são escassas e a umidade relativa do ar é baixa. Já no NEB, no período úmido, as chuvas ocorrem em menor quantidade e, consequentemente, a umidade relativa do ar é baixa; no período seco, as chuvas são de maior volume na costa litorânea. Vale elucidar que, sob altas taxas de precipitação, o solo no NEB tende a evaporar e, com isso, proporciona mais facilidade de arrasto de fluxos de aerossóis pelos turbilhões do que no MT.

Portanto, a análise micrometeorológica com fluxos atmosféricos compreende a absorção e extinção de partículas na faixa de 1020 nm. Essa análise foi realizada a partir da localidade de Petrolina-PE em comparação ao seu entorno no Nordeste Brasileiro, além dos fenômenos correlatos para potencializar o entendimento do que ocorre nas condições de tempo em cada estação do ano.

Figura 21 – Boxplot da máxima precipitação por estação (2004-2019) com média geral

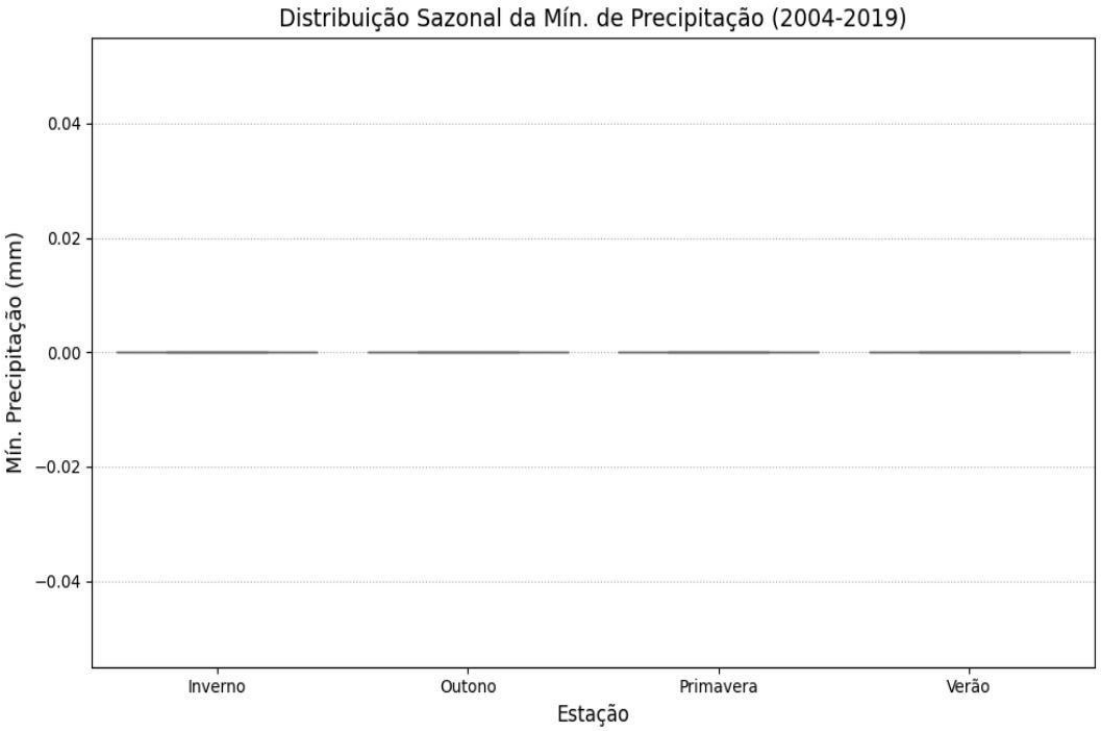


Fonte: INMET.

Figura 21: Boxplot (precipitação máxima).

A figura 21 ilustra máximo de precipitação ocorre no outono de 2014 (116,6 mm) e durante a primavera de 2009 (72 mm). As estações com maiores índices pluviométricos são o outono e a primavera. Os menores índices de ocorrência de chuvas ocorrem durante o verão de 2013 (42,7 mm), seguido do inverno de 2014 (18,7 mm). Contudo, esse padrão climático não segue os máximos para as estações de inverno e verão. Durante o outono, em média, seu valor é 24,643ºC; ao longo da série de dados, há uma tendência de aumento da temperatura do ar. Já durante a primavera, em média, é de 24,028ºC; a temperatura do ar tende a aumentar ao longo dos anos. Já no verão, tende a diminuir a tendência uniforme, em média de 24,542ºC, e no in-verno é de 22,170ºC. Em suma, a temperatura do ar próximo à superfície tende a um aumento e possivelmente tem seus efeitos no cenário de mudanças meteorológicas. Dado o exposto, a umidade específica, no inverno e primavera (0,013 kg/kg), apresenta uniformidade na variabilidade dos dados. Já durante o verão, é de 0,015 kg/kg e, no outono, de 0,014 kg/kg, praticamente o mesmo valor médio para as duas estações. Quanto ao quesito variabilidade, a umidade específica possui uma tendência a um aumento suave.

Figura 32 – Boxplot da precipitação mínima por estação (2004-2019)

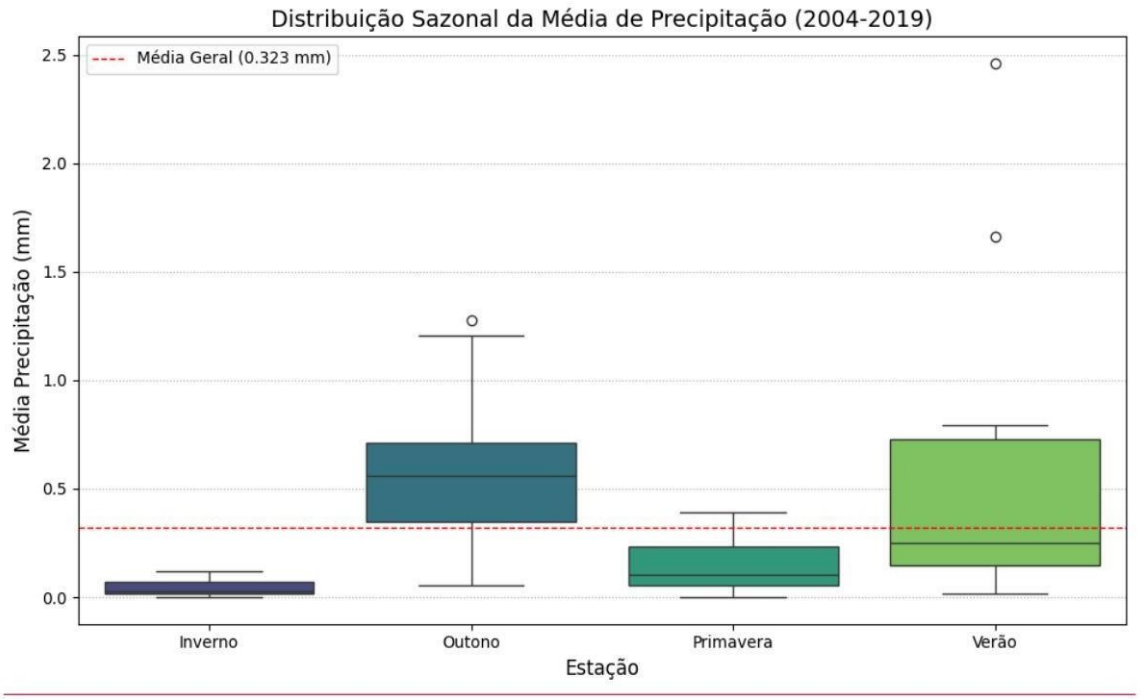


Fonte: INMET.

Figura 22: Boxplot (precipitação mínima).

Ao longo de toda a série de dados, existe pelo menos 1 dia em cada estação do ano, com precipitação nula, demonstrando assim o regime de escassez pluviométrica ou irregular (figura 22).

Figura 23 – Boxplot da distribuição sazonal da média de precipitação por estação



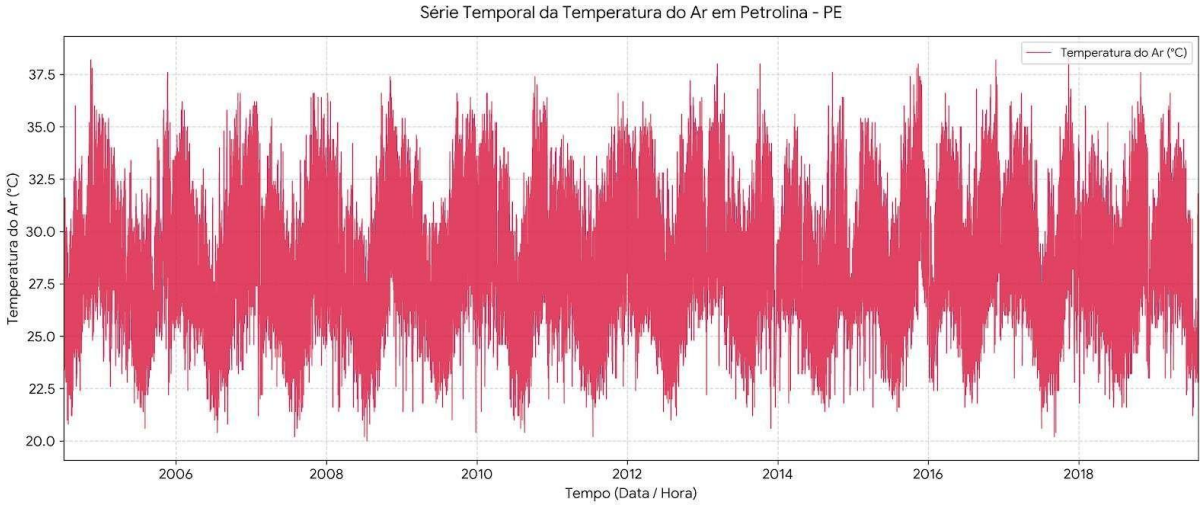
Fonte: INMET.

Figura 23: Boxplot (precipitação média).

Conforme os dados para o estudo da sazonalidade média de precipitação a figura 23 nos mostra a variabilidade da série, observando que o trimestre mais chuvoso é o outono (0,602 mm) em média, seguido pelo verão (0,514 mm). As estações de menores índices de chuva média são o inverno (0,045 mm) e a primavera (0,144 mm).

5.2.2 Temperatura do ar ao nível da estação em Petrolina-PE

Figura 24 – Série temporal da temperatura do ar (Tar °C) em Petrolina-PE



Fonte: INMET.

Figura 24: Série temporal da temperatura do ar (INMET).

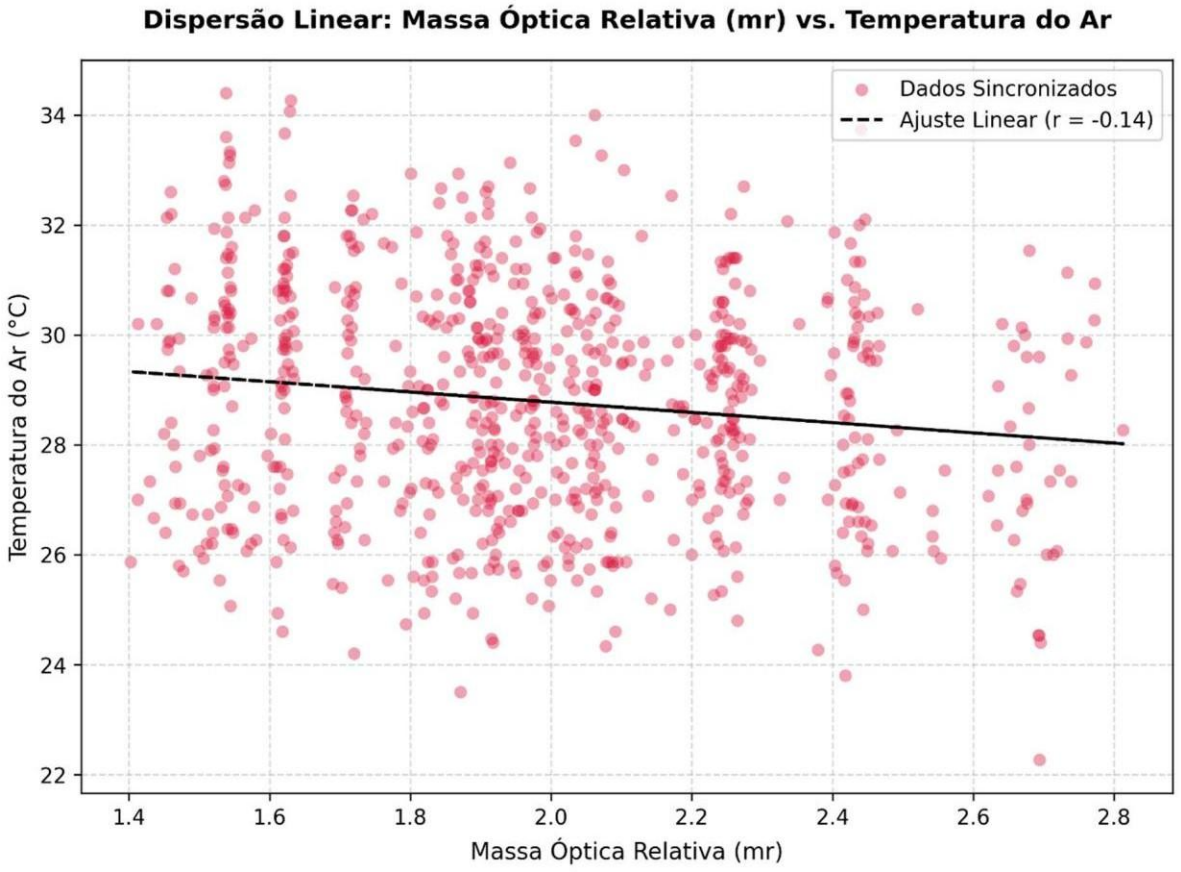
Comparando o gráfico de fluxo da coluna de fluxos de aerossóis grossos (1020 nm) com a temperatura do ar, o gráfico da variável Tar (°C) na figura 24, nota-se que, quando os valores de **Tar (°C)** são máximos nos períodos de 2007, 2009 e 2013, coincidem com os picos do gráfico de fluxos de aerossóis, com a subsidência do ar em altos níveis e com o fator de umidade de grande escala. Quanto aos mínimos apresentados em 2005 e 2011, nota-se que esses períodos são equivalentes aos valores mínimos de temperatura do ar. Diante do exposto, pode-se dizer que existe correlação -0.5626 negativa moderada forte entre os valores máximos e mínimos da temperatura do ar e as componentes coincidentes de absorção e extinção, marcado fortemente pela modulação termodinâmica ou fortemente relacionado de maneira forte com os efeitos da temperatura do ar, ou ainda podemos dizer que é induzida pela temperatura do ar de maneira inversa, atreladas mais ao período chuvoso.

Petrolina é uma região de baixa latitude (próxima ao Equador) e, com isso, recebe incidência solar direta; ou seja, situa-se em uma faixa do globo mais aquecida, o que justifica que, quando as temperaturas são mais altas, maiores sejam os valores de evaporação da superfície. Nesse sentido, comparando-se com os dados de fluxo AOD de absorção e extinção, quando esses valores são máximos, a resposta dinâ-mica da temperatura consiste em aquecer o ambiente.

A variabilidade anual da concentração de fluxos de aerossóis ópticos é muito distinta da variação anual térmica do ar. A concentração de fluxos de aerossóis ópticos

mostra picos e sua variação é sazonal, com valores mais altos na estação seca e mais baixos na estação chuvosa. A temperatura do ar mostra regularidade em seu padrão anual, com valores mais altos na estação chuvosa e temperaturas mais amenas na estação seca.

Figura 25 – Dispersão entre Massa Óptica Relativa (mr) e temperatura do ar (Tar)

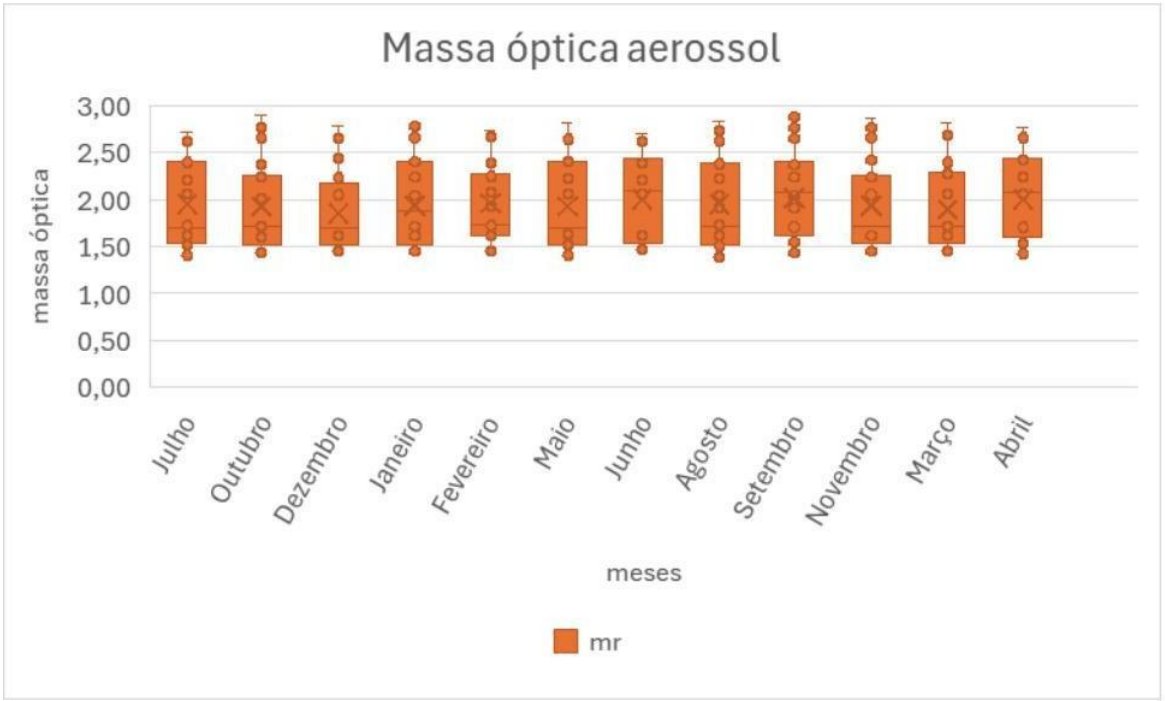


Fonte: AERONET e INMET.

Figura 25: Correlação entre a massa óptica e a temperatura do ar pelo método de Pearson.

Há uma correlação entre os gráficos de massa óptica de fluxos de aerossóis e os dados de temperatura do ar em Petrolina; porém na figura 25, essa correlação linear é estimada em -0.1418 muito negativa fraca pelo método de Pearson. Como ambas as variáveis não estão no mesmo instante, o coeficiente de correlação é muito próximo de zero. Pode-se inferir que a relação se dá predominantemente a processos termodinâmicos complexos, não a posição apenas do sol, como por exemplo a temperatura do ar, vento, umidade específica, entre outros parâmetros.

Figura 26 – Boxplot anual da massa óptica de aerossóis por mês



Fonte: AERONET.

Figura 26: Boxplot anual de massa óptica.

Os dados de temperatura do ponto do ar têm um padrão sazonal, apresentando temperaturas mais altas de outubro a abril e temperaturas mais baixas de maio a setembro, o que corresponde à monção de inverno na América do Sul e a menores concentrações de material particulado na atmosfera. Já os dados de massa óptica na figura 26 também apresentam comportamento sazonal, permitindo observar valores altos de agosto a dezembro, durante a monção de verão, e valores com teor reduzido de janeiro a julho. A concentração de fluxos de aerossóis tem tendência de aumento na estação quente.

Nos meses de julho a setembro, a concentração é maior, com um máximo global em agosto, quando comparada à temperatura do ponto de orvalho e após a passagem de luz proeminente da radiação solar. No Nordeste brasileiro, observam-se nesse período valores maiores devido à menor ocorrência de nebulosidade, o que implica maior insolação. Já a variável temperatura do ponto de orvalho tem máximos de agosto a dezembro e valores menores de janeiro a fevereiro. Vale destacar que o clima semiárido sugere que na região há baixa nebulosidade, porém com uma grande amplitude térmica diária devido à baixa umidade relativa do ar e à alta insolação nos

meses de seca. A topografia da região plana contribui para a baixa variação de temperatura ao longo do ano.

> De acordo com PEREIRA et al. (2023, p. 3), o fenômeno El Niño leva a significativos aumentos na carga de aerossóis em regiões específicas. Sabendo disso, os fatores meteorológicos, tais como circulação e precipitação, provavelmente desempenham um papel fundamental na mudança das concentrações de aerossol, o que resulta no transporte e na remoção dos materiais particulados.

Alta Floresta e Cuiabá possuem biomas distintos em relação a Petrolina. Vale correlacionar que, quanto maior for a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), maior será o quantitativo de AOD; A TSM tem um impacto significativo na quantidade de massa óptica na atmosfera. Com o solo descoberto após o período de queimadas, gera-se o resíduo armazenado; em mesoescala, com a retirada da cobertura vegetal, a temperatura do ponto de orvalho e a pressão de vapor tendem a aumentar, o conteúdo de água do solo tende a evaporar e contribui para o transporte de umidade. Além disso, as condições atmosféricas contribuem para a disponibilidade de energia para evaporação, e o elemento-chave para esse processo é a velocidade do vento.

Quanto mais intensa for a velocidade do vento próximo à superfície, juntamente com o solo e a camada superficial aquecida, mais rápido será o processo atrelado aos turbilhões, o que facilita a absorção e a extinção de partículas; o processo envolvido é o gradiente horizontal de temperatura.

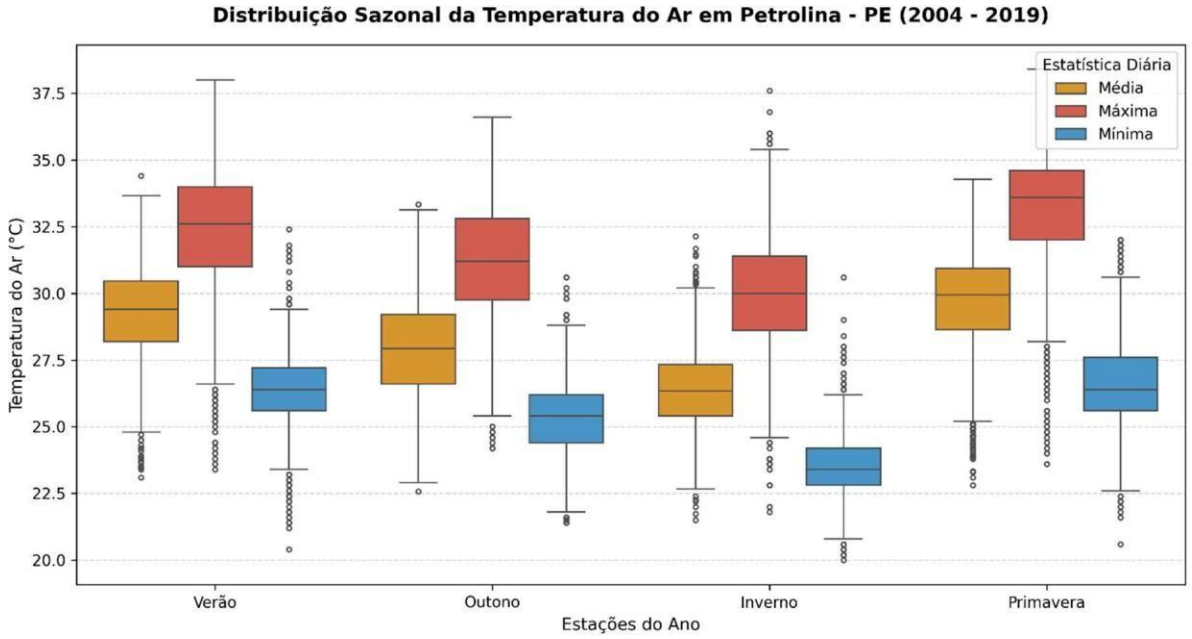
> COUTO et al. (2020, p. 9) destacam que a influência da temperatura nos movimentos de massa de ar pode ter contribuído para o processo de dispersão do material particulado na região. Observou-se também a existência de um comportamento sazonal da concentração estimada de material particulado. Em todos os anos estudados, os meses de seca (setembro ao início de fevereiro) apresentaram as principais concentrações de MP2,5. As menores concentrações de MP2,5 foram registradas no período de chuvas do Ceará, e de maneira mais acentuada nos últimos três meses na quadra chuvosa (meses da estação outono).

No estudo de MOREIRA et al. (2008), a dispersão e a concentração de material particulado dependem das condições meteorológicas, com ênfase na temperatura do ar, que afeta a formação de fluxos de aerossóis. Quando as temperaturas estão mais altas, gera-se o ambiente propício para a formação de fluxos de aerossóis secundários, sendo facilitada também pela velocidade de reações químicas. A estabilidade atmosférica, a formação de fluxos de aerossóis e a velocidade de reação são influenciadas pela temperatura do ponto de orvalho, afetando a concentração de fluxos de aerossóis na atmosfera.

O único processo reversível na atmosfera é o da parcela de ar. Esta tem energia interna; o estado inicial e o final dependem de transformações adiabáticas, sem

receber ou ceder calor entre meios, na interação entre a parcela e a vizinhança. Ainda assim, quando retrocede o estado de expansão e há a compressão propriamente dita, a temperatura aumenta e o trabalho é convertido em calor. Retomando o assunto da parcela de material particulado, quando há os processos de expansão (volume t0) ao deslocar-se para alturas maiores, o ar fica menos denso e ela é deslocada para cima através do empuxo; contudo, ao retornar à superfície, a parcela comprime (volume t1). Sendo assim, na atmosfera, os processos sempre têm um período de resposta, e o elemento sensível, nesse caso, é a temperatura do ponto de orvalho.

Figura 27 – Boxplot da temperatura do ar por estação (2004-2019)



Fonte: INMET.

Figura 27:Boxplot (temperatura do ar máxima, mínima e média).

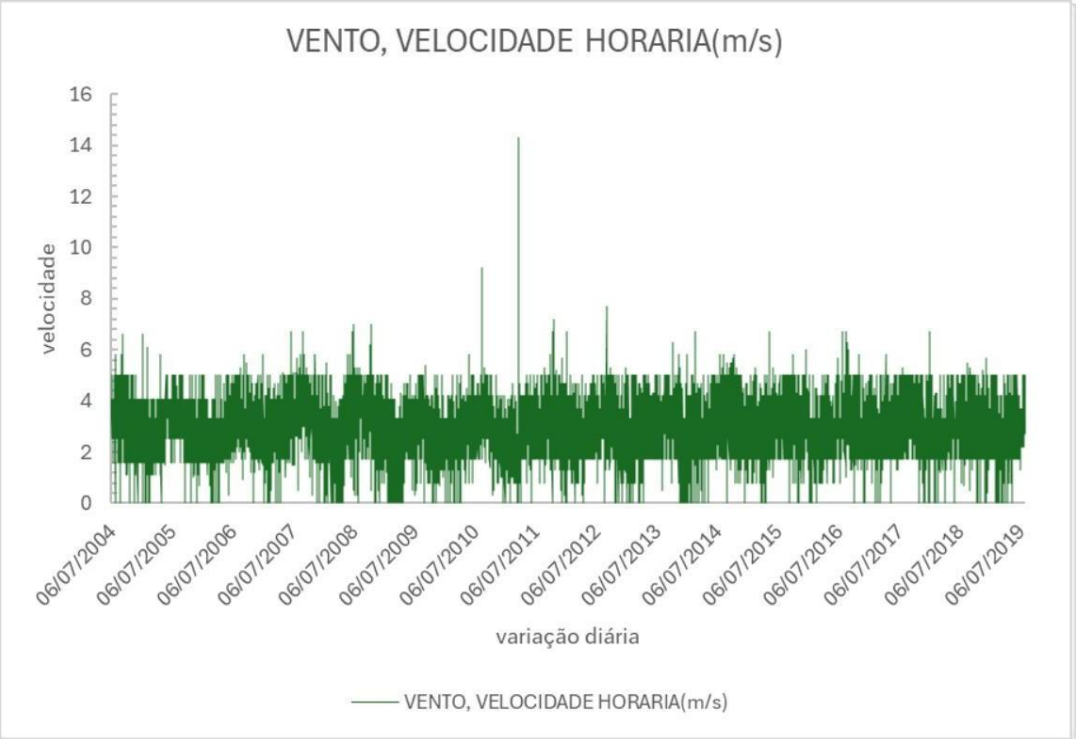
A temperatura do ar máxima do ar é apresentada na figura 27 é intuitivo notar que na primavera de 2015 cujo valor corresponde a (38,4 ºC), todavia durante o outono de 2017 faz (36,6ºC), no inverno de 2006 se mantém aquecido chegando a (37,6ºC) e no verão (38,0ºC). Em outras palavras, a primavera foi mais quente que o verão isso justifica que o ambiente estava mais seco e registrou picos de temperatura ou ainda, a temperatura tende a ser mais elevada e não teve compensação natural da umidade do ar; existe ainda um padrão elevado de temperatura do ar em todas as estações do ano em Petrolina, ou seja, há um aquecimento na região o que mantém por predomínio a massa de ar quente bem próximo a superfície.

A temperatura mínima do ar tende a se equivaler no inverno de 2008 (20,6ºC) e na primavera de 2013, no verão (20,4ºC) de 2009, e no outono (21,4ºC) de 2006. Um fator atenuador para a temperatura mínima do ar são os eventos micrometeorológicos extremos, como a possível passagem de sistemas frontogênicos que são fatores de filtragem na atmosfera reduzindo assim a quantidade de aerossóis, assim é demostrado na figura 27 essa variabilidade.

Em média, a temperatura do ar para outubro (29,5ºC), primavera (29,8ºC) e verão é de 29ºC, já no inverno é de aproximadamente 26ºC (figura 27). Outro ponto elementar é que as massas de ar tendem a causar variações na temperatura do ar em Petrolina e regiões circunvizinhas, sendo, assim, um fator necessário a investigar.

5.2.3 Processos de velocidade de partículas de fluxos de aerossóis com a massa de ar na microescala em Petrolina

Figura 28 – Série temporal da velocidade horária do vento (m/s) entre 2004 e 2019



Fonte: INMET.

Figura 28: Velocidade do vento horária a partir dos dados do INMET.

O gráfico da velocidade do vento como ilustra na figura 28, mostra que os picos de intensidade do vento correspondem a quedas de absorção e extinção de partículas, e os vales da componente velocidade do vento correspondem a picos de absorção e extinção de partículas. Isso pode ser observado em todos os anos do gráfico, porém é evidente entre os anos de 2005 e 2010.

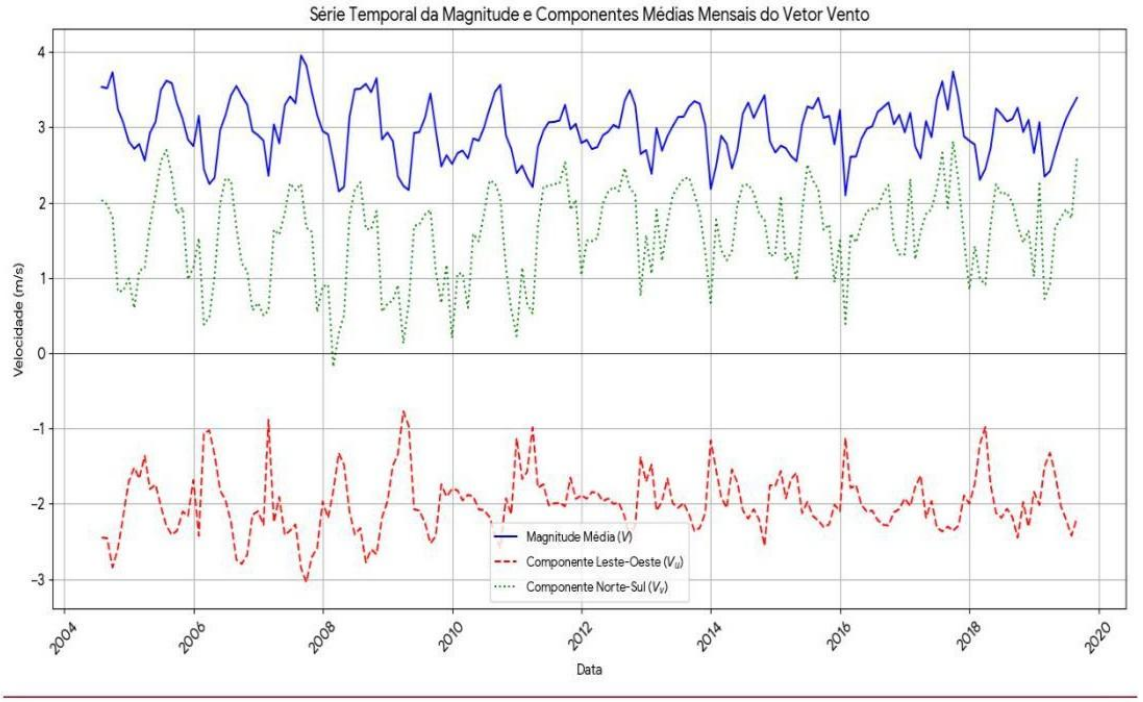
Ao investigar a correlação, sugere-se que o vento pode influenciar a quantidade de partículas absorvidas e extintas na atmosfera. Quando o vento está mais forte, devido à junção de sistemas atuantes na América do Sul (Alta da Bolívia e o Cavado do Nordeste), ele pode dispersar as partículas mais rapidamente; há também processos de mistura na atmosfera, o que implica que a velocidade da massa de ar difere da velocidade de dispersão de partículas, levando a uma menor absorção e extinção. O posicionamento da ZCIT afasta ou aproxima (norte/sul) da América do Sul a região de

confluência dos alísios e favorece a atenuação dos ventos alísios no Nordeste Brasileiro (NEB). Além disso, o Sistema Anticiclônico do Atlântico Sul é o sistema associado ao deslocamento da ZCIT. Por outro lado, quando o vento está mais fraco, as partículas podem se acumular na atmosfera, levando a uma maior velocidade nos processos de absorção e extinção.

Comparando o gráfico da concentração de fluxo de aerossóis ópticos com o gráfico de velocidade do vento, observa-se uma tendência crescente com sua variação anual e as especificidades de cada ano. Compreende-se que as estimativas dos dados observacionais indicam que os períodos com maior velocidade do vento coincidem com os períodos de menor concentração de fluxos de aerossóis. Diante disso, sugere-se que a velocidade do vento é de grande importância na dispersão de partículas em suspensão na atmosfera.

A representação gráfica da massa óptica do aerossol na coluna atmosférica atribuída à média mensal durante o período de 2004 a 2019 e o gráfico da velocidade do vento horária para Petrolina-PE denotam uma variação diária. O gráfico evidencia que a massa óptica do aerossol é geralmente maior durante os meses de verão, com picos nos meses de agosto e setembro. Isso corresponde ao aumento da atividade da poeira; pode-se destacar também o sal marinho que adentra a costa litorânea de Pernambuco na região durante o verão, pois a vegetação seca e o solo classificado como arenoso são mais suscetíveis à erosividade.

Figura 29 – Série temporal da velocidade do vento e componentes médias mensais



Fonte: INMET.

Figura 29: Componentes médias mensais e magnitude do vento.

Ao analisar a figura 29 o vento predominante para sua série temporal é forte em sua componente do eixo Leste e também apresenta uma cooperação significativa na componente do eixo norte. Combinando ambos, o vetor vento é direcionado para o quadrante nordeste em microescala em Petrolina. Outrossim, estas considerações são baseadas na direção horária multiplicada por 10.

Tabela 1 – Magnitude e componentes médias do vetor vento em Petrolina-PE

Magnitude Média Geral	2.98 m/s
Velocidade V	
Componente Leste-Oeste Média	2.00 m/s
Vu	
Componente Norte-Sul Média	1.56 m/s
Vv	

Fonte: INMET.

A velocidade do vento é geralmente mais alta durante os meses de verão. Isso pode estar relacionado à presença dos ventos alísios de leste, secos e quentes, que,

por sua vez, sopram da região norte do Brasil durante o verão. Os dois gráficos tendem a equivaler-se; pode-se observar que a massa óptica do aerossol é maior durante os períodos em que a velocidade do vento é mais alta. Isso está relacionado à presença do vento seco e quente, que transporta fluxos de aerossóis para a região de Petrolina-PE. Existem fluxos de aerossóis agitados pelos turbilhões na região de Petrolina e fluxos de aerossóis transportados para Petrolina de outras regiões.

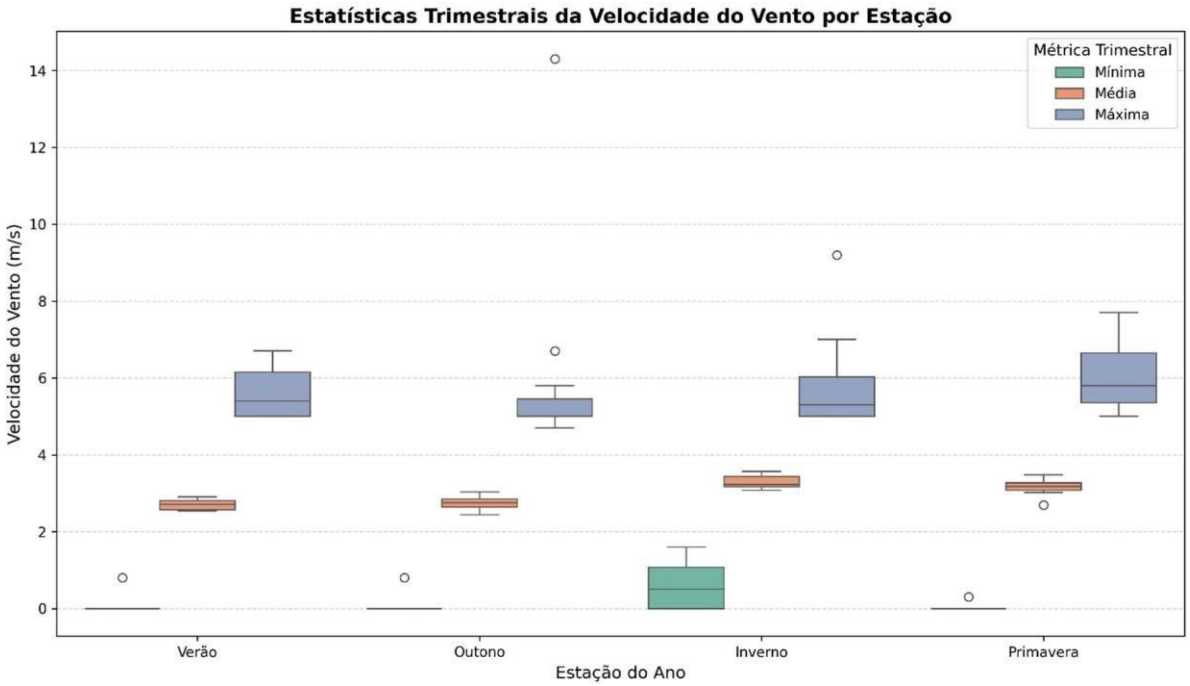
De julho a setembro, a taxa residual de armazenamento de partículas na atmosfera, no inverno, é menor, o que é explicado pela maior presença de fluxos de aerossóis provenientes de queima e poeira. De julho a setembro, a velocidade do vento é maior, e isso é justificado pelo gradiente de pressão atmosférica.

> SANTOS et al. (2019 p. 60) verificaram a variabilidade da direção predominante do vento no período analisado, com o diagrama dividido em parcelas de 12 setores, compostos por ângulos de 15° cada, no sentido horário. Verifica-se que a direção predominante é a direção sudeste, com variação entre ~105° e ~135°.

Segundo MELO, Ewerton Cleudson de Sousa et al. (2014), Petrolina é caracterizada pela presença de ventos do quadrante sudeste e de uma inversão de subsidência na baixa troposfera devido ao domínio da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que é mais intensa no final do outono e no inverno austral (Ramos, 1975). Essa inversão parece inibir a formação de chuvas isoladas, mantendo baixa a quantidade de precipitação.

A concentração de fluxos de aerossóis ópticos tem a suscetibilidade de ser influenciada pela inversão de subsidência. A presença de fluxos de aerossóis na atmosfera tende a absorver e refletir a radiação solar e, com isso, o perfil atmosférico apresenta uma tendência crescente nos valores de temperatura do ar que, por sua vez, intensifica a inversão. Isso ocorre dado que a inversão de subsidência funciona como estrutura de confinamento de micropartículas em suspensão na atmosfera na região da baixa troposfera, aumentando a concentração de fluxos de aerossóis nessa faixa na cidade de Petrolina.

Figura 30 – Boxplot da distribuição sazonal do máxima, média, mínima de vento (2004-2019) por estação



Fonte: INMET.

Figura 30: Boxplot (vento máximo, média e mínima).

Os máximos de vento ocorrem podemos visualizar na figura 30 no eixo x é descrito como a variabilidade temporal pelas estações do ano e no eixo y vemos a variação da velocidade do vento, no outono de 2011 (14,3 m/s), no inverno (9,2 m/s) de 2010, na primavera (7,7 m/s) de 2012 e no verão (6 m/s) de 2015. Em Petrolina, o período com maior intensidade de vento ocorre durante o outono e a primavera; porém, os menores valores ocorrem no verão devido a eventos micrometeorológicos. Logo, outra importante informação é a anomalia do padrão sazonal durante o inverno, todavia justificada pela possível mudança no padrão de circulação atmosférica da localidade de Petrolina.

Ao longo de toda a série de dados na figura 30 existe pelo menos 1 dia em cada estação do ano, com configuração do estado atmosférico em calmaria, demos-trando assim, o regime de circulação inibida ou enfraquecida, em baixos níveis na atmosfera na localidade Petrolina.

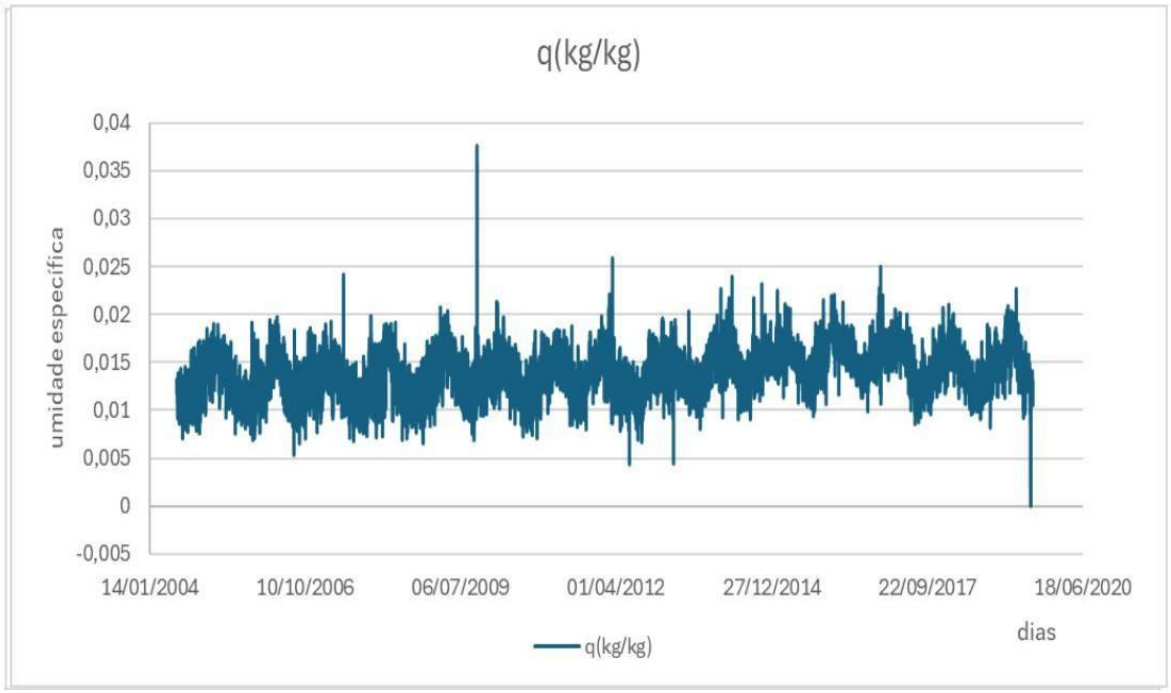
A amostra denota a variabilidade média de vento na figura 30, a primeira coluna indica a variação anual ao longo da série de dados e as linhas representam as estações ao longo dos anos, método para comparar todas as variáveis com um período

em comum. A coluna total geral retorna ao valor médio anual da linha respectiva ao ano em estudo.

Durante o inverno, a intensidade média do vento é de 3,283m/s; na primavera, 3,162m/s; no verão, 2,746m/s; e no outono, 2,706m/s. Ao longo dos anos, em média, existe uma tendência de diminuição da intensidade do vento; observa-se que, a partir do outono, inicia-se o decréscimo gradual da variável. Ainda é possível notar a variabilidade do vento observando a diferença entre as massas de ar, assim como as massas de ar sofrem alterações a partir da variabilidade da insolação e umidade específica.

5.2.4 Efeitos da umidade específica do ar no ambiente que contém partículas de fluxos de aerossóis

Figura 31 – Série temporal da umidade específica entre 2004 e 2020



Fonte: INMET.

Figura 31: Série temporal da umidade específica do ar horária a partir dos dados do INMET.

A umidade específica do ar tem uma variação sazonal clara. Definida como a massa de vapor d'água contida em uma unidade de massa de ar úmido (ar seco + vapor d'água), ela é influenciada por fatores micrometeorológicos, como temperatura, nebulosidade e precipitação, que variam ao longo das estações.

Na estação chuvosa, que ocorre geralmente entre os meses de novembro a maio e é caracterizada por instabilidade atmosférica, a umidade relativa do ar em Petrolina é mais elevada. A evaporação da água do período chuvoso e a maior cobertura de nuvens contribuem para o aumento dos níveis de vapor d'água no ambiente atmosférico; consequentemente, encontram-se menores concentrações de fluxos de aerossóis atmosféricos.

Nos meses mais secos, entre junho e outubro, a umidade do ar em Petrolina é significativamente menor. Quando ocorre o baixo quantitativo precipitável, sob a configuração de estabilidade atmosférica, a intensa radiação solar e os ventos secos somam-se para reduzir os níveis de umidade; consequentemente, encontram-se maiores concentrações de fluxos de aerossóis atmosféricos.

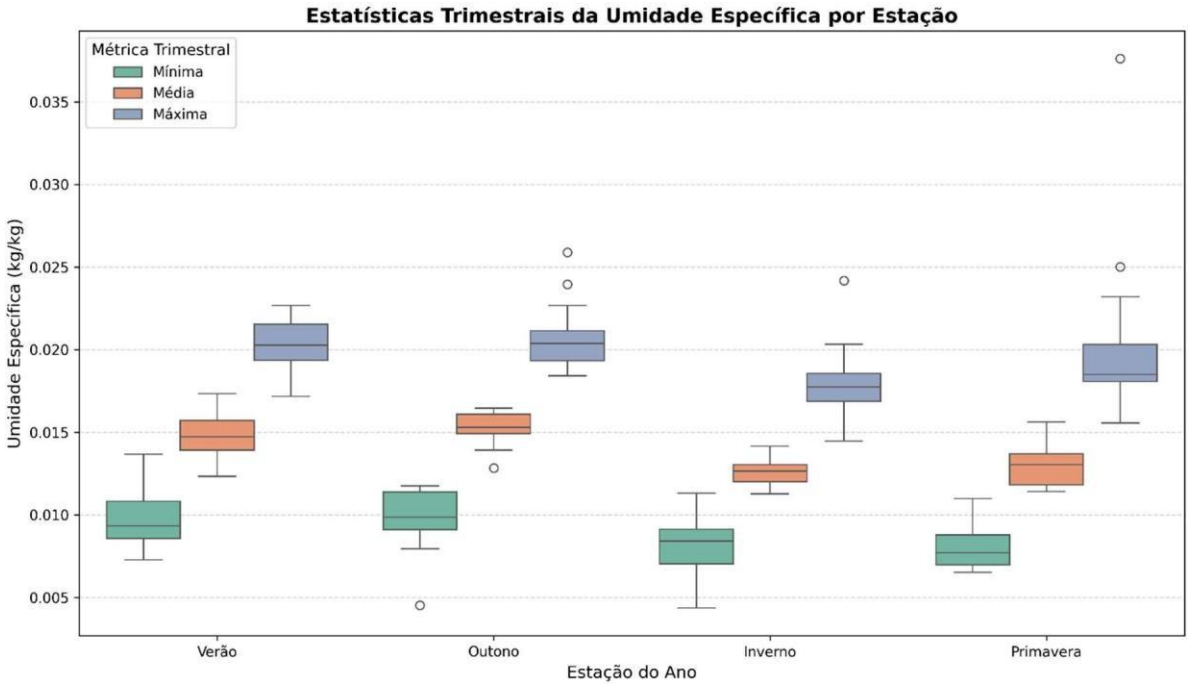
> PALÁCIOS et al. (2014, p. 15) realizaram análises de correlação de Pearson entre AOD e (umidade relativa) UR para as escalas mensais. Os resultados revelaram que a UR pode ser o fator de influência dominante na relação entre AOD e o índice de precipitação na região. Ao se realizar uma análise de correlação parcial tratando os dados mensais de precipitação, nota-se que a maioria das correlações negativas anteriormente observadas diminui, ou não são significativas, quando a UR é usada como variável de controle. Essa observação parece indicar que a UR é o fator dominante que impulsiona a relação entre AOD e o índice de precipitação na escala mensal.

Contudo, na região semiárida nordestina, a umidade específica e o AOD podem influenciar o clima, contribuindo como reguladores térmicos e elementos fundamentais para a formação de nuvens. Existe também a influência do uso da terra no desenvolvimento de circulações locais; por exemplo, uma das forçantes principais é a descontinuidade da cobertura do solo, o que gera a turbulência de fluxo resultante de mudanças na interação com a atmosfera. Dado o exposto, os contornos, a orografia e a radiação solar funcionam como fontes de fluxo energético que, por sua vez, advectam o ar aquecido para o alto e contribuem para o desenvolvimento da camada bem misturada e para o lançamento ascendente de partículas (fluxos de aerossóis) através da convecção térmica. Excepcionalmente, o princípio da atmosfera consiste em armazenar energia e partículas.

Há também a circulação local devido ao relevo ser suave e ondulado, com vales muito abertos. Durante o período diurno, o ar sobe a encosta (vento anabático) e, durante o período noturno, desce (vento catabático), o que contribui para os processos de ascensão e deposição de fluxos de aerossóis atmosféricos. Existem também os fluxos de calor no solo, que dependem da condutividade térmica, do calor específico e da emissividade, os quais dependem da interação de outros fatores. Em Petrolina,

observa-se fortemente a influência do rio São Francisco, que funciona como um bombeamento energético para a evaporação. Nota-se ainda o contraste terra-água na região, tornando o ambiente propício para a evaporação da água (ciclo hidrológico) e formação de nuvens. Ao longo do período diurno, esses fatores contribuem para a advecção e o transporte de partículas em suspensão na atmosfera, tanto pelos turbilhões de escala local (orografia plana) quanto pela intensificação decorrente da junção com a mesoescala (ventos alísios). Quando se trata da junção da microescala com as demais escalas atmosféricas, observa-se uma tendência de aumento na velocidade do vento próximo à superfície e nas taxas de reações de absorção e extinção de fluxos de aerossóis ópticos.

Figura 32 – Boxplot da distribuição sazonal da máxima, média e mínima da umidade específica (2004-2019) por estação



Fonte: INMET.

Figura 32: Boxplot (umidade específica máxima, média e mínima).

O máximo de umidade específica é retratado na figura 32, ocorre na primavera (0,038 kg/kg) de 2009; a atmosfera está mais úmida, o que facilita a formação de nuvens. No outono (0,026 kg/kg) de 2012 e no inverno (0,024 kg/kg) de 2007, os valores são menores. No verão (0,022 kg/kg), observa-se o efeito inverso, o que é explicado pela possibilidade de mudança no padrão de circulação ou ainda por outros fatores (intensidade de radiação, umidade) na atmosfera em Petrolina.

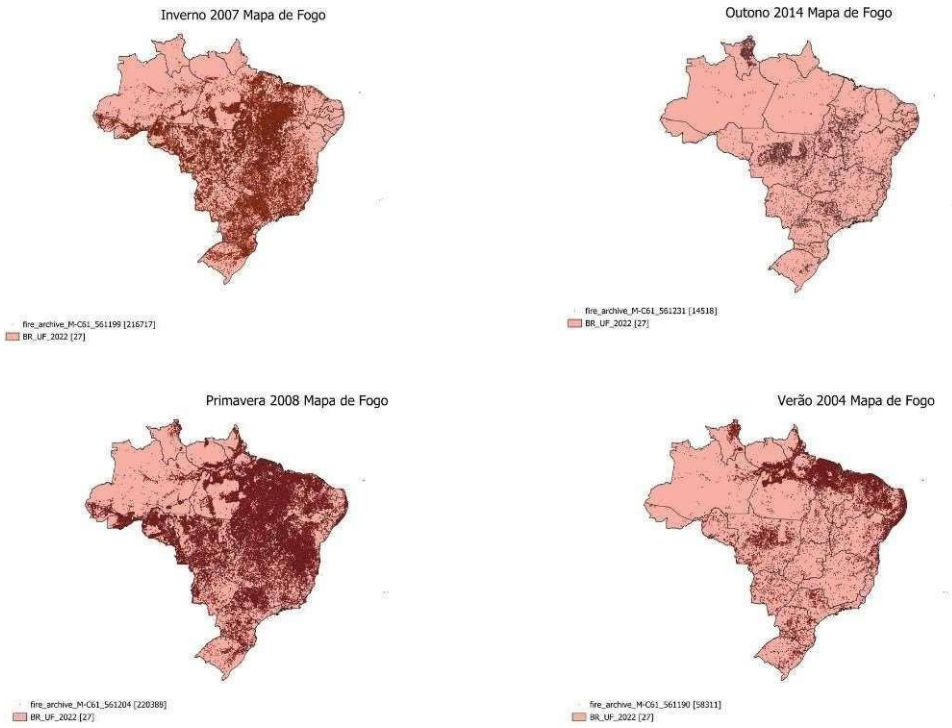
Os valores mínimos de umidade específica em Petrolina-PE se tornam mais evidentes quando a representatividade da massa de vapor de água passa por processos de mistura com a massa de ar úmido. Durante o inverno, o valor é geralmente de 0,004 kg/kg em 2012; no outono, 0,005 kg/kg; na primavera, 0,007 kg/kg, com maior frequência deste resultado ao longo da série; e no verão atinge 0,008 kg/kg (figura 32). É notória também a repetição desse valor durante o período de estudo, indicando condições de ar seco.

Em média como mostra na figura 32, ao longo das estações, a umidade específica tende a um aumento. Observa-se um padrão regular durante as estações de inverno e primavera, de 0,013 kg/kg; além disso, há tendências aproximadas durante o outono (0,015 kg/kg) e o verão (0,014 kg/kg). É de grande valia avaliar o padrão de circulação atmosférica, pois, através desse parâmetro, será possível investigar o que pode influenciar a umidade em Petrolina-PE.

6. MAPAS: ATIVIDADE DE FOGO

Com os mapas de atividade de fogo podemos notar a frequência acumulada ao longo de cada estação de focos de oriundos de incêndio a partir da coleção MODIS. Será possível averiguar a correlação quantitativa de máximos e mínimos de absortividade e extinção de partículas em suspenção na atmosfera.

Os mapas a seguir representam o período de atividade de fogo para o período de absortividade máxima de material particulado:



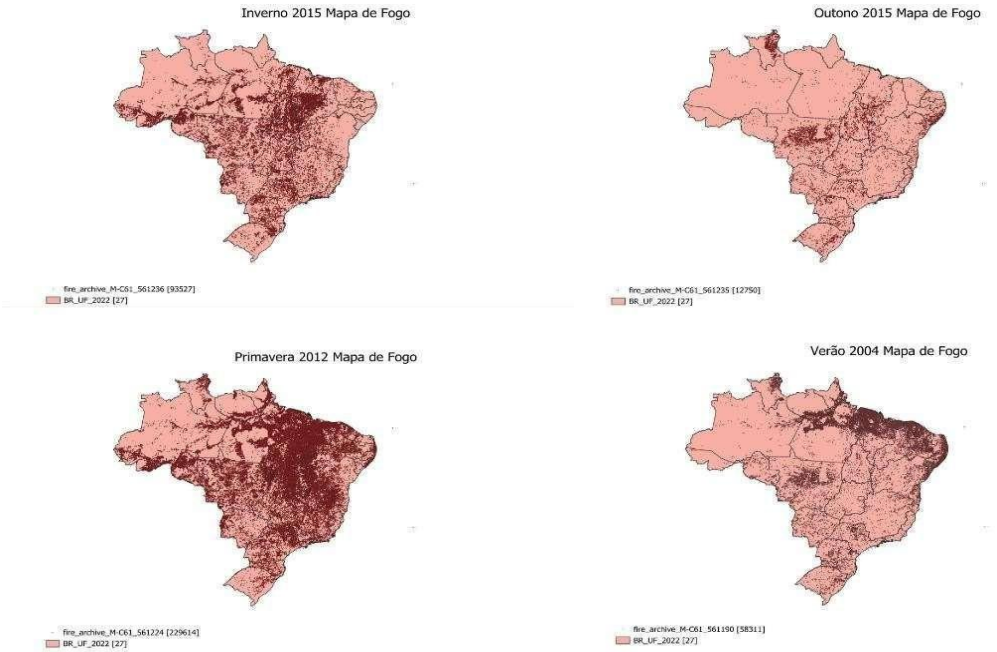
Fonte: FIRMS

Figura 33: Atividade de fogo durante a absortividade máxima

O período máximo de absortividade em Petrolina-Pe corresponde aos máximos de atividade de fogo,vemos que no inverno de 2007 no Nordeste Brasileiro é mais expressivo no litoral e tamém nesse periodo coincide com área potencial de fogo, vale ressaltar que as regiões(norte,centro-oeste, sul, e sudeste) teve maior densidade do que quando comparado com o NE. Durante o outono de 2014 no territorio brasileiro, apesar de durante o estudo ser considerado uma área máxima teve na amostra de dados áreas pontuais de fogo em todo o territorio que por sua vez é também uma região de máxima absortividade, é possivel notar que no litoral na parte tropical vemos maior densidade de pontos, e menor atividade de fogo na região equatorial, assim como regiões umidas como São Paulo. Durante a primavera de 2008 é possivel notar

grande densidade de focos de incendio em praticamente todo o territorio brasileiro, contudo a região equatorial, semi-árido e subtropical são áreas de menores indices de fogo, do que quando comparado as demais áreas, vale destacar que quando comparado com os dados do AERONET a primavera de 2008 e inverno de 2007, coincide com os máximos de absortividade de material particulado em suspensão na atmosfera. Já no verão a maior densidade de pontos representada pelo MODIS é em praticamente todo o litoral nordestino, assim como na área tropical típico em Roraima,e em linhas gerais na região semiárida com especificações a área costeira nordestina e região norte, vale destacar também que os máximos de absortividade também ocorrem na area central do Mato Grosso, e região subtropical.

Os mapas a seguir representam o período de atividade de fogo para o período de extinção máxima de material particulado:



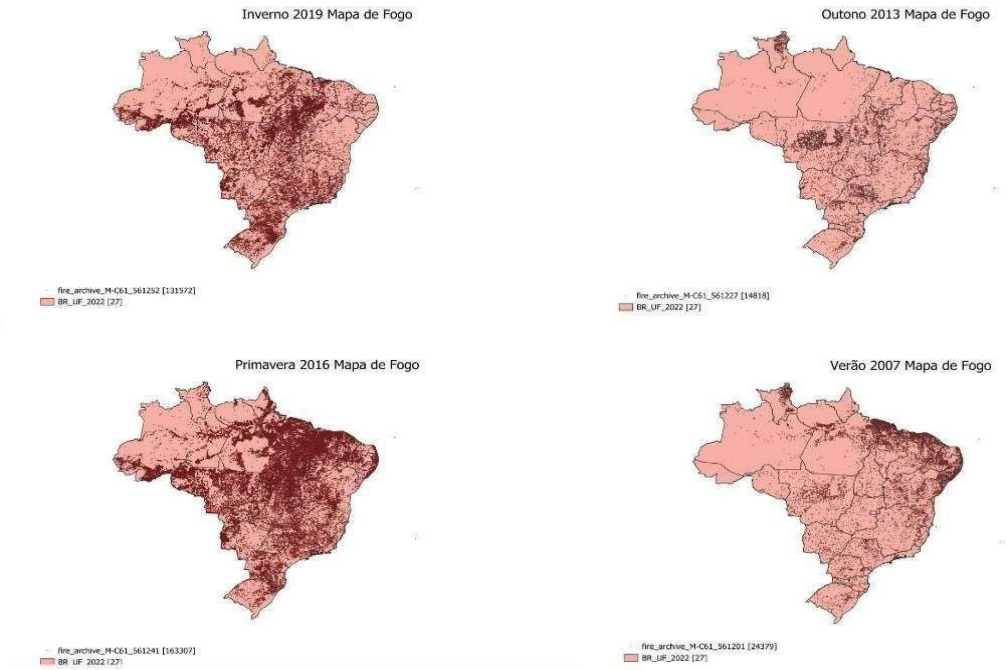
Fonte: FIRMS

Figura 34: Atividade de fogo durante os processos de extinção máxima

Podemos inferir que ocorre no mesmo período de máxima absortividade no verão de 2004 ocorre também um máximo de extinção de material particulado proveniente de queima, para esse momento é considerado a mesma análise

micrometeorológica do item anterior. Durante o outono de 2015 vemos menores áreas com atividade de fogo como é sabido a estação corre o mínimo de extinção de material particulado destaca-se ainda com as regiões litorânea entre os estados de PE e AL, e também MT e PI, são áreas de maior propagação na área tropical em termos gerais. Contudo no verão ocorre de maneira crítica nas regiões litorâneas onde coincide o período de aquecimento das correntes marítimas, ou seja, área de maior densidade pontuais de incêndio alternando entre a área tropical litorânea e semiárida, outra área crítica é no estado do MT que é bem definida a partir de máximos de temperatura praticamente o ano todo embora ocorra máximo de extinção na estação chuvosa. Em Petrolina notamos que há um máximo de extinção da série de dados, porém comprova-se que em praticamente todo o território Brasileiro estava num período de máxima intensidade de fogo. Já durante o inverno no NEB é bastante expressivo a diminuição de pontos de atividade de fogo, é nítido que nesse mesmo período em Petrolina há um máximo da intensidade de fogo, contudo quando comparado entre regiões a região tropical tem uma tendência a maiores amplitudes térmicas.

Os mapas a seguir representam o período de atividade de fogo para o período de absortividade/extinção mínima de material particulado:



Fonte: FIRMS

Figura 35: Atividade de fogo mínima durante os processos de absortividade e extinção

Embora o comportamento isento/ minímo de atividade de fogo em Petrolina-PE, é perceptível que durante a analise de absortividade e extinção coincidem com o mesmo periodo ademais a região Petrolina tem atividade de fogo detectada pelo monitoramento do MODIS. Quando olhamos para a região nordeste vemos os vetores da variavel expressa de forma mais suave, contudo no inverno de 2019 na região do MATOPIBA teve maior intensidade de fogo, dado isso especificamente a BA ocorre um mínimo do território. Todavia quando comparado com o territorio Brasileiro em linhas gerais ócorre o efeito inverso,existe uma modulação atmosferica ou ainda, há os máximos de intensidade de fogo, já isso é um indicativo de máxima absortividade e extinção na região Nordestina. Já durante a primavera na componente absortiva e extinta, nota-se a primavera da variavel extinção é maior intensidade do que quando comparada a extinção de partículas. Durante a primavera a concentração de pontos de fogo expressa-se de forma suavizada na região semiárida, contudo o entorno há uma grande propagação de incendios. O comporatamento mínimo de abortividade e extinção de material particulado é durante o outonno de 2013 e no verão de 2007, a região de Petrolina sofre atenuação negativa tanto para absortividade quanto para a extinção. No verão de 2007 os máximos de fogo ocorre proximo as areas costerias nordestina sofrendo os efeitos do aquecimento devido a maritimidade, dado isso a região semiarida por defifição há escassez de chuvas aí propicia os efeitos na cobertura vegetal (deixando-as mais seca) e facilitando o periodo de queima.

7 CONCLUSÕES

Este estudo procurou entender comportamento dos aerossóis provenientes de queimadas no Nordeste brasileiro, focalizando na região de Petrolina-PE, assim, no decorrer dessa investigação foi analisado como ocorre o processo de absorção e extinção, evidenciando suas relações com as variáveis meteorológicas em escala micrometeorológica.

Por meio da integração dos dados observacionais feita nesta investigação, foi possível identificar padrões significativos de variação sazonal e espacial, o que demonstra a influência direta das queimadas e das condições atmosféricas, onde quando ocorre o máximo de absortividade e extinção ocorre um máximo de precipita-ção e velocidade do vento. Já no outono ocorre valores mínimos de áreas com focos de calor/atividade de fogo e isso implica mínimos de absortividade e extinção, a dinâ-mica dos aerossóis e suas propriedades ópticas que são inerentes a localidade Pe-trolina.

Os resultados revelam que em período seco apresentou os maiores valores de profundidade óptica de aerossóis (AOD) e de absorção terminam se elevando durante o inverno, o que provoca o aumento das emissões de partículas atreladas às queimadas agrícolas e à um aumento de precipitação e esta funciona como um mecanismo de filtragem da atmosfera. Por outro lado, em período úmido, foi notado uma redução dos índices de extinção, voltados à filtragem atmosférica e à maior umidade específica do ar durante a primavera. Esses contrastes reforçam a forte dependência dos processos ópticos e físicos dos aerossóis em relação às variáveis meteorológicas locais, como variável resposta na atmosfera é a temperatura do ar e a resposta ao ambiente tem tendencias de aquecimento, já a umidade específica tem valor máximos durante a primavera e isso é influenciado pelo Rio São Francisco que é um armazenamento de água natural e o ambiente aquecido funciona como mecanismo acelerador da quantidade de vapor na atmosfera próximo a superfície devido a evaporação do corpo d'água.

Com relação à análise espectral na faixa de 1020 nm foi possível evidenciar a presença de partículas maiores, típicas de emissões de queimadas e poeira mineral, que desempenham papel indispensável na modificação do balanço radiativo da superfície e vem alterando a quantidade de luz que chega à superfície, sendo assim um agente modulador das condições atmosféricas, daí o albedo de superfície influencia em um tempo maior de suspensão do material particulado. Ainda, a trajetória das

massas de ar revelou o transporte regional de material particulado, propondo que as queimadas não afetam apenas áreas de origem, mas também regiões vizinhas, influenciando a qualidade do ar e as características micrometeorológicas do local e esse transporte tende a seguir de acordo com as células de circulação da região e esse fluxo tende por maior frequência estar direcionado no quadrante nordeste.

Diante deste contexto, considera-se por meio deste estudo, que os aerossóis de queimadas afetam o sistema atmosfera-solo no semiárido pernambucano, alterando processos radiativos e térmicos em diferentes períodos sazonais.

Busca-se ampliar as análises das componentes de absorção e extinção de partículas de fluxos de aerossóis para diferentes localidades do Nordeste brasileiro, assumindo que os processos de absorção/extinção tendem a ser mais elevados na estação seca. Além disso, será possível investigar a camada limite planetária, a presença de material particulado em vários níveis atmosféricos e possíveis teleconexões com a camada de ozônio em diferentes bandas. Existe interconexão entre os dados de absorção e extinção, e a relação entre a presença de fluxos de aerossóis evidencia uma redução da radiação solar. A preservação do meio ambiente e a proteção à saúde pública são responsabilidades compartilhadas, havendo, assim, o engajamento entre governo, sociedade civil e comunidade científica, o que oportuniza a garantia dos direitos ambientais para os petrolinenses e gerações futuras.

REFERÊNCIAS

AERONET Inversion Products. AERONET Inversion Products. NASA Aeronet, [S.l.], [2010?]. 8 p. Disponível em: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/Inversion_products_for_V3.pdf. Acesso em: 20 set. 2024.

Aerosol light absorption and its measurement: A review. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, v. 110, n. 11, p. 844- 878, 2009. aerosol spatial variability: Impacts on air quality and climate change. One Earth, v. 8, n. 3, p. 101237, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101237. Acesso em: [15/04/2025].

AIKEN, Allison C. et al. Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0)–Part 1: Fine particle composition and organic source apportionment. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 9, n. 17, p. 6633- 6653, 2009.

ANSMANN, Albert; RIEBESELL, Maren; WEITKAMP, Claus. application for surface particulate matter estimates. Remote sensing of environment, v. 265, p. 112674, 2021.

ARTAXO, P. et al. Physical and chemical properties of aerosols in the Amazon and Central Brazil. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 107, n. D20, p. LBA 49-1-LBA 49-14, 2002.

Atmospheric concentrations and fluxes. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 102, n. D3, p. 3819-3830, 1997.

BAKER, A. R. et al. Soluble trace metals in aerosols over the tropical southeast Pacific offshore of Peru. Biogeosciences, v. 13, n. 3, p. 817-825, 2016.

BAO, Fangwen et al. Propriedades de aerossóis continentais e recuperação de absorção usando o método de aprendizado de máquina de floresta aleatória específico para sensoriamento remoto geoestacionário. Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente , v. 311, p. 114275, 2024.

BARCELLOS, Christovam de Castro et al. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. 2009.

BELHADJI, Redha et al. Evolução inicial do miniburaco na camada de ozônio gerado pelos incêndios florestais australianos de 2019-2020, observado por satélite e instrumentos terrestres. EGUsphere , v. 2025, p. 1-19, 2025.

BOTUCATU/SP. In: Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar- CBENS. 2010.

BOUCHER, O. Atmospheric Aerosols: Properties and Climate Impacts. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. (Springer Atmospheric Sciences).

BROCK, Charles A. et al. Ambient aerosol properties in the remote atmosphere from global-scale in situ measurements. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 21, n. 19, p. 15023-15063, 2021.

BUCHARD, V. et al. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies. Journal of Climate, v. 30, n. 17, p. 6851-6872, 2017.

CARDOSO, João Gomes. Estudo Do Aerossol (Poeira Do Sara) Na região De Cabo Verde. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de Aveiro (Portugal).

Cazorla M, Giles DM, Herrera E, Suárez L, Estevan R, Andrade M, Bastidas Á. Latitudinal and temporal distribution of aerosols and precipitable water vapor in the tropical Andes from AERONET, sounding, and MERRA-2 data. Sci Rep. 2024 Jan 9;14(1):897. doi: 10.1038/s41598- 024-51247-9. PMID: 38195912; PMCID: PMC10776852.

CAZORLA, María et al. Latitudinal and temporal distribution of aerosols and precipitable water vapor in the tropical Andes from AERONET, sounding, and MERRA-2 data. Scientific Reports, v. 14, n. 1,

CHEN, Annan et al. Surface albedo regulates aerosol direct climate effect. Nature Communications, v. 15, n. 1, p. 7816, 2024.

CHEN, Xi et al. First retrieval of absorbing aerosol height over dark target using TROPOMI oxygen B band: Algorithm development and

COLE, I. S.; PATERSON, D. A. Possible effects of climate change on atmospheric corrosion in Australia. Corrosion engineering, science and technology, v. 45, n. 1, p. 19-26, 2010.

COUTO, Lucas de Oliveira do et al. Estimativa da concentração média diária de material particulado fino na região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará, Brasil. Cadernos de Saúde Pública, v. 36,

DA COSTA PEREIRA, Augusto Gabriel; BARROS, Lucas Rangel Coringa; DA SILVA PALÁCIOS, Rafael. INFLUÊNCIA DO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL NA PROFUNDIDADE ÓTICA DO AEROSSOL AO SUL DA AMAZÔNIA. 2023.

DA SILVA MARTINHO, Herculano. Descrição das técnicas e acessórios de medida do sistema de espectroscopia de absorção no infravermelho FT-IR 660 da Varian. 2009.

DA SILVA PALÁCIOS, Rafael et al. Análise da profundidade ótica de aerossóis e coeficiente de Angstrom no cerrado Mato- grossense. Revista Brasileira de Climatologia, v. 14, 2014.

DA SILVA, Simone Nazaré R. Poluição atmosférica: o efeito da pluma das queimadas sobre o meio ambiente. em Biologia, p. 146, 2020.

DAL PAI, Alexandre; ESCOBEDO, João Francisco. Desempenho Mensal Das Correções Geométricas Sobre Os Valores Da Irradiância Solar Difusa Medidos Pelo Anel De Sombreamento Meo Em Diferentes Coberturas De Céu. In: Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar- CBENS. 2012.

DE ASSUNÇÃO ALMEIDA, Elza Maria. Aerossol Carbonoso: Contribuição Para a Sua Caracterização. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de Aveiro (Portugal).

DE OLIVEIRA, Aline M. et al. Analysis of atmospheric aerosol optical properties in the Northeast Brazilian atmosphere with remote sensing data from MODIS and CALIOP/CALIPSO satellites, AERONET photometers and a groundbased lidar. Atmosphere, v. 10, n. 10, p. 594, 2019.

DE SOUZA, Amaury et al. Relação Entre Profundidade Óptica Do Aerossol E Precipitação Tendo a Umidade Relativa Como Fator De Influência. GEOgraphia, v. 23, n. 51, 2021.

DEHKHODA, Naghmeh et al. Retrieval of black carbon absorption aerosol optical depth from AERONET observations over the world during 2000–2018. Remote Sensing, v. 14, n. 6, p. 1510, 2022.

DEMOTT, Paul J. et al. African dust aerosols as atmospheric ice nuclei. Geophysical Research Letters, v. 30, n. 14, 2003.

DOS SANTOS, Fábio Sandro et al. Análise estatística da velocidade do vento em Petrolina-PE utilizando as distribuições Weibull e a Burr. Journal of Environmental Analysis and Progress, p. 057-064, 2019.

ELLISON, G. Barney; TUCK, Adrian F.; VAIDA, Veronica. Atmospheric processing of organic aerosols. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 104, n. D9, p. 11633-11641, 1999.

ESCRIBANO ALISIO, Jerónimo José. Capa límite, reflectancia y espesor óptico de aerosoles sobre Santiago. 2012.

FEARNSIDE, Philip Martin. A vulnerabilidade da floresta amazônica perante as mudanças climáticas. Oecologia Brasiliensis, v. 13, n. 4, p. 609-618, 2009.

FERNÁNDEZ GARCÍA, Alfonso Javier. Caracterización higroscópica del aerosol atmosférico mediante la técnica lidar Raman. 2017.

FLORES-ROJAS, José Luis et al. Analysis of extreme meteorological events in the central Andes of Peru using a set of specialized instruments. Atmosphere, v. 12, n. 3, p. 408, 2021.

GAETANI, Marco et al. The near future availability of photovoltaic energy in Europe and Africa in climate-aerosol modeling experiments. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 38, p. 706- 716, 2014.

GALLAGHER, M. W. et al. Measurements of aerosol fluxes to Speulder forest using a micrometeorological technique. Atmospheric Environment, v. 31, n. 3, p. 359- 373, 1997.

GELHAUSEN, Elmar et al. Characterization of vertical aerosol flows by single particle mass spectrometry for micrometeorological analysis. Atmospheric research, v. 102, n. 1-2, p. 49-56, 2011.

Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. Remote Sensing of Environment, 178, 31-41.

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-

GONG, S. L. et al. Modeling sea*-*salt aerosols in the atmosphere:

HELMIG, D. et al. Atmosphere*-*ocean ozone fluxes during the TexAQS 2006, STRATUS 2006, GOMECC 2007, GasEx 2008, and AMMA

HENAO, M. A. V. Avaliação da influência dos aerossóis no balanço de energia e fluxos superficiais turbulentos no Vale do Aburrá. 2020. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2020.

HOLTON, J. R. An introduction to dynamic meteorology. 4th ed. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2004.

Holben, B. N., et al. (1998). AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. Remote Sensing of Environment, 66(1), 1-16. (Se usou inversões/propriedades ópticas avançadas como SSA ou índice de refração, adicione também: Dubovik, O., & King, M. D. (2000). A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 105(D16), 20673-20696).

HORVATH, H. Atmospheric light absorption–A review. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, v. 27, n. 3, p. 293-317, 1993.

HUEBERT, Barry J. et al. An overview of ACE*-*Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 108, n. D23, 2003.

ICHOKU, Charles et al. MODIS observation of aerosols and estimation of aerosol radiative forcing over southern Africa during SAFARI 2000. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 108, n. D13, 2003.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em:

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Ed. AP. Vancouver Canadá, 1983. 389p.

JÚNIOR, Altemar Lopes Pedreira et al. Evaluation of Aerosol Optical Depth (Aod) Estimated by Copernicus Atmosphere Monitoring Service (Cams) in Brazil. 2024.

KNIPPERTZ, Peter; TODD, Martin C. Mineral dust aerosols over the Sahara: Meteorological controls on emission and transport and implications for modeling. Reviews of Geophysics, v. 50, n. 1, 2012.

KOREN, I. et al. Measurement of the Inhibition of Cloud Formation by Anthropogenic Aerosols. Science, v. 303, n. 5662, p. 1342-1345, 2004.

LEE, Jaehwa et al. Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements. Atmospheric Environment, v. 44, n. 26, p. 3110-3117, 2010.

LEITE, Pedro; DIAS, Silva. Climate Change: Specific Research Issues IN THE Tropical Area FOR Developing Countries.

LI, Xiaolan et al. Impactos da cobertura de neve nas condições micrometeorológicas e na qualidade do ar rural no nordeste da China. Atmospheric Research , v. 282, p. 106516, 2023.

LI, Zhanqing et al. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. Reviews of geophysics, v. 54, n. 4, p. 866-929, 2016.

LINDAU, Filipe Gaudie Ley et al. Proxies for atmospheric circulation over the Amazon basin from the aerosol composition in a Nevado Illimani firn core, Bolivia. The Cryosphere, v. 15, n. 3, p. 1383- 1397, 2021.

LIOU, K. N. An Introduction to Atmospheric Radiation. 2ª ed. New York: Academic Press, 1980.

LIOU, Kuo-Nan; SASAMORI, Takashi. On the transfer of solar radiation in aerosol atmospheres. Journal of Atmospheric sciences, v. 32,

LIU, H. et al. Aerossóis troposféricos sobre o oeste do Oceano Atlântico Norte durante as campanhas de inverno e verão do ACTIVATE 2020: ciclo de vida, transporte e distribuição. EGUsphere [pré-impressão], 2024. DOI: 10.5194/egusphere-2024-1127.

LIU, Jun et al. Historical footprints and future projections of global dust burden from bias-corrected CMIP6 models. npj Climate and Atmospheric Science, v. 7, n. 1, p. 1, 2024.

MANAVI, S. E. I.; AKTYPIS, A.; SIOUTI, E.; SKYLLAKOU, K.; MYRIOKEIFALITAKIS, S.; KANAKIDOU, M.; PANDIS, S. N. Atmospheric

MARENCO, F. et al. Characterization of atmospheric aerosols at Monte Cimone, Italy, during summer 2004: source apportionment and transport mechanisms. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 111, n. D24, 2006.

MARING, H. et al. Mineral dust aerosol size distribution change during atmospheric transport. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 108, n. D19, 2003.

MARTINEZ, Daniel et al. Laboratory of Atmospheric Microphysics and Radiation (LAMAR): a set of sensors for the study of extreme Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar. Optics letters, v. 15, n. 13, p. 746-748, 1990.

MELO, Ewerton Cleudson de Sousa; ARAGÃO, Maria Regina da Silva; CORREIA, Magaly de Fatima. Regimes do vento à superfície na área de Petrolina, Submédio São Francisco. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, p. 229-241, 2014.

MENZEL BARRAQUETA, Jan-Lukas et al. Atmospheric deposition fluxes over the Atlantic Ocean: a GEOTRACES case study. Biogeosciences, v. 16, n. 7, p. 1525-1542, 2019. meteorological events in the Central Andes of Peru. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2020. p. 12664.

MMAME, B. et al. Assessment of CMIP6 model performance in simulating atmospheric aerosol and precipitation over Africa. Advances in Space Research, v. 72, n. 8, p. 3096-3108, 2023.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero. Um século e meio de aquecimento global. Ciência Hoje, v. 18, n. 107, p. 20, 1995.

MOOSMÜLLER, H.; CHAKRABARTY, R. K.; ARNOTT, W. P.

MORAES, Elisabete Caria et al. Avaliação da acurária do albedo do MODIS para a cultura de cana-de-açucar no Nordeste. 2019.

MOREIRA, Davidson Martins; TIRABASSI, Tiziano; MORAES, Marcelo Romero de. Meteorologia e poluição atmosférica. Ambiente & Sociedade, v. 11, p. 1- 13, 2008.

MOSCHOS, Vaios et al. Quantificação das propriedades de absorção de luz e composição molecular do aerossol de carbono marrom da combustão de biomassa na África Subsaariana. Environmental Science & Technology , v. 58, n. 9, p. 4268- 4280, 2024.

MUKKAVILLI, S. K. et al. Assessment of atmospheric aerosols from two reanalysis products over Australia. Atmospheric research, v. 215, p. 149-164, 2019.

MUÑOZ, Ricardo C. et al. New Observations of the Meteorological Conditions Associated with Particulate Matter Air Pollution Episodes in Santiago, Chile. Atmosphere, v. 14, n. 9, p. 1454, 2023.

NUNES, Lucí Hidalgo. A escala nas ciências atmosféricas. *Revista do Instituto de Geociências*, São Paulo, v. 19, n. 1/2, p. 71-73, jan./dez. 1998.

OLIVEIRA, A.M: Estudo do Impacto na Espessura Ótica da Atmosfera na Região Sul do Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas, 2013.

PAULIQUEVIS, Theotonio et al. O papel das partículas de aerossol no funcionamento do ecossistema amazônico. Ciência e Cultura, v. 59, n. 3, p. 48-50, 2007.

PRADO, Nathalia Velloso; DA COSTA, Simone Sievert. Relação da Precipitação, Queimadas e Aerossóis no estado do Mato Grosso com ênfase em dados de Satélite no período de 2000-2012.

QUEFACE, Antonio J. et al. Climatology of aerosol optical properties in Southern Africa. Atmospheric Environment, v. 45, n. 17, p. 2910-2921, 2011.

RODRIGUES, Antônio Félix Flores et al. Utilização de isótopos naturais como traçadores da dispersão de poeiras do Saara: um caso de estudo nos Açores-Portugal. Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia, v. 2, n. 1, 2005.

ROLDÁN HENAO, Natalia. Evaluation of the influence of aerosols on radiative processes and turbulent surface flows within the Aburrá Valley

ROMERA, Kelly Sousa et al. Variabilidade interanual das propriedades óticas de aerossóis em biomas distintos na Amazônia Legal. Revista Brasileira de Climatologia, v. 25, 2019.

ROSAS SANTANA, Jorge et al. Biomass burning smoke transport and radiative impact over the city of Sao Paulo: An extreme event case study. EGUsphere, v. 2025, p. 1-23, 2025.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

SHIN, Sung-Kyun et al. Absorption aerosol optical depth components from AERONET observations of mixed dust plumes. Atmospheric Measurement Techniques, v. 12, n. 1, p. 607- 618,

STEINKE, Ercília Torres. Climatologia fácil. Oficina de Textos, 2016.

STULL, R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

TUCCELLA, Paolo et al. Modeling the black and brown carbon absorption and their radiative impact: The June 2023 intense Canadian boreal wildfires case study. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 130, n. 7, p. e2024JD042674, 2025.

TWOMEY, S. Atmospheric Aerosols. Amsterdã: Elsevier Scientific Publishing Company, 1977. (Developments in Atmospheric Science, 7). v. 115, n. D8, 2010.

VAREJÃO-SILVA, M. A., 2006: Meteorologia e Climatologia. Versão Digital. 449 pp.

VEIGA, Adilson Vladmir Cabral Da. Estudo das propriedades ópticas dos aerossóis no norte da África e da influência da zona de convergência intertropical no transporte de poeira mineral em direção a América do Sul. 2017.

VEISSID, Nelson; ESCOBEDO, João F.; GALDINO, Marco Antonio. Taxa de absorção atmosférica sobre as cidades de Botucatu- SP e Rio de Janeiro-RJ. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, p. 455-468, 2010.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.D. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: UFV, 2004. 449p.

WAGNER, Robert; SCHEPANSKI, Kerstin. Quantifying fire*-* driven dust emissions using a global aerosol model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, v. 17, n. 4, p. e2024MS004466, 2025.

WANG, Zilin et al. Intensification of mid*-*latitude cyclone by aerosol*-* radiation interaction increases transport of Canadian wildfire smoke to northeastern US. Geophysical Research Letters, v. 51, n. 13, p. e2024GL108444, 2024.