



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

ALTEMAR LOPES PEDREIRA JÚNIOR

**TENDÊNCIAS SAZONAIS E A RELAÇÃO ENTRE AEROSSÓIS E A TEMPERATURA
DO AR EM DIFERENTES NÍVEIS DA ATMOSFERA NO BRASIL**

**CUIABÁ-MT
2025**

ALTEMAR LOPES PEDREIRA JÚNIOR

**TENDÊNCIAS SAZONAIS E A RELAÇÃO ENTRE AEROSSÓIS E A
TEMPERATURA DO AR EM DIFERENTES NÍVEIS DA ATMOSFERA NO BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Física Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado.

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Da Silva Palácios.

**CUIABÁ-MT
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

P371t Pedreira Júnior, Altemar Lopes.

Tendências sazonais e a relação entre aerossóis e a temperatura do ar em diferentes níveis da atmosfera no Brasil [recurso eletrônico] / Altemar Lopes Pedreira Júnior. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 71 f., il. color., pdf). -- 2025.

Orientador: Leone Francisco Amorim Curado.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2025.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Aerossóis atmosféricos. 2. Análises estatísticas. 3. Reanálise. 4. Variabilidade Climática. I. Curado, Leone Francisco Amorim, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: TENDÊNCIAS SAZONAIS E A RELAÇÃO ENTRE AEROSSÓIS E A TEMPERATURA DO AR EM DIFERENTES NÍVEIS DA TEMPERATURA NO BRASIL

AUTOR: DOUTORANDO ALTEMAR LOPES PEDREIRA JÚNIOR

Tese defendida e aprovada em 29 de maio de 2025.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. PROF. DR. LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO [Presidente Banca / Orientador]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. PROF. DR. RAFAEL DA SILVA PALÁCIOS [Examinador Interno]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

3. PROF. DR. JOÃO BASSO MARQUES [Examinador Interno]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

4. PROFA. DRA. JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA QUERINO [Examinadora Interna]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

5. PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE SANTOS QUERINO [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

CUIABÁ, 29/05/2025.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES, Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 01/08/2025, às 09:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael da Silva Palácios, Usuário Externo**, em 01/08/2025, às 09:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juliane Kayse Albuquerque da Silva Querino, Usuário Externo**, em 01/08/2025, às 09:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alexandre Santos Querino, Usuário Externo**, em 01/08/2025, às 09:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 01/08/2025, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOÃO BASSO MARQUES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 01/08/2025, às 13:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **8201162** e o código CRC **9D1E50A7**.

Dedico à minha família, alicerce de minha vida, por todo amor, apoio e incentivo incondicional ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

- ✚ Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me sustentado e guiado em cada etapa desta jornada acadêmica;
- ✚ À minha família, em especial a Altemar Lopes Pedreira, Sônia Marcia Merklein, Henrique Merklein, Jonathan Merklein, Joyce Merklein, Yasmim Merklein e Mirella Garcia, por todo o apoio, incentivo e amor incondicional ao longo deste percurso;
- ✚ Ao meu orientador, Professor Dr. Leone Francisco Amorim Curado, pela orientação dedicada, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos transmitidos durante todo o doutorado;
- ✚ Ao meu coorientador, Professor Dr. Rafael da Silva Palácios, pela atenção constante, apoio técnico e científico e contribuições fundamentais para o desenvolvimento desta tese;
- ✚ Aos amigos que tive o privilégio de conhecer durante minha jornada acadêmica na UFMT, em especial Luiz Octávio, Névio Lotuffo, Jonas Rambo e Israel Ivo, pelo companheirismo e apoio ao longo deste percurso.
- ✚ Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA), pela excelência no ensino e pelas contribuições ao meu crescimento acadêmico e profissional;
- ✚ Aos técnicos do PPGFA, pela colaboração, suporte e amizade ao longo do doutorado;
- ✚ À Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte institucional e concessão da bolsa de estudos, fundamentais para a realização deste trabalho;
- ✚ À banca examinadora desta tese, pelo tempo dedicado à leitura, pelas observações criteriosas e pelas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

EPÍGRAFE

“E sabemos que todas as coisas contribuem juntamente para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados por seu decreto” (Bíblia Sagrada).

RESUMO

Os estudos foram conduzidos com foco na Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) no Brasil, com o objetivo de avaliar sua estimativa, variabilidade e influência sobre o clima regional. O primeiro estudo teve como objetivo validar as estimativas de AOD do produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) em comparação com dados da rede AERONET em doze sítios distribuídos pelo país. Foram utilizados indicadores estatísticos como o coeficiente de correlação de Pearson, índice “d” de Willmott, Erro Médio Quadrático, Erro Médio Absoluto e o Percentual de Viés. Os resultados demonstraram boa concordância geral entre os dados do CAMS e as medições de campo, embora tenham sido observadas superestimções em locais como Ji-Paraná e subestimções em Petrolina. A variabilidade sazonal também foi evidenciada, com maiores concentrações de AOD durante a estação seca e reduções significativas no período chuvoso, destacando a influência das queimadas e de atividades antrópicas sobre os níveis de aerossóis atmosféricos. O segundo estudo investigou a influência dos aerossóis sobre a temperatura do ar (Tar) no Brasil, utilizando dados do CAMS entre 2003 e 2022. Foram analisadas as componentes AOD_TOTAL, AOD_BC (carbono negro) e AOD_SULF (sulfato), considerando recortes por bioma e camadas atmosféricas entre 1000 e 850 hPa. Os resultados revelaram que aerossóis absorvedores, como o carbono negro, apresentaram correlação positiva com o aumento da temperatura superficial, enquanto aerossóis dispersivos, como o sulfato, apresentaram correlação negativa, especialmente em áreas urbanas e industrializadas. Observou-se uma tendência de aumento da AOD_TOTAL na primavera, associada ao pico de queimadas, e um aquecimento progressivo da temperatura do ar nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. Em conjunto, os dois estudos evidenciam a relevância da AOD como variável-chave na análise da qualidade do ar e das dinâmicas climáticas regionais no Brasil. As análises reforçam a importância de estratégias de monitoramento e controle das emissões atmosféricas, especialmente diante das pressões antrópicas crescentes e das mudanças climáticas em curso.

Palavras-chave: aerossóis atmosféricos; análises estatísticas; reanálise; variabilidade climática.

ABSTRACT

The studies were conducted with a focus on Aerosol Optical Depth (AOD) in Brazil, aiming to evaluate its estimation, variability, and influence on regional climate. The first study aimed to validate AOD estimates from the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) product by comparing them with data from the AERONET network at twelve monitoring sites across the country. Statistical indicators such as Pearson's correlation coefficient, Willmott's index "d", Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Percent Bias (PBIAS) were used. The results showed good overall agreement between CAMS data and ground-based measurements, although overestimations were observed in locations such as Ji-Paraná and underestimations in Petrolina. Seasonal variability was also evident, with higher AOD concentrations during the dry season and significant reductions during the rainy season, highlighting the influence of biomass burning and anthropogenic activities on aerosol levels. The second study investigated the influence of aerosols on air temperature (Tar) in Brazil, using CAMS data from 2003 to 2022. The components AOD_TOTAL, AOD_BC (black carbon), and AOD_SULF (sulfate) were analyzed, considering spatial cuts by biome and atmospheric layers between 1000 and 850 hPa. The results revealed that absorbing aerosols, such as black carbon, showed a positive correlation with surface warming, while scattering aerosols, such as sulfate, showed negative correlations, especially in urban and industrialized areas. A trend of increasing AOD_TOTAL during the spring was observed, associated with the peak of biomass burning, along with a continuous warming of air temperature, particularly in the Central-West and Southeast regions. Together, the two studies highlight the relevance of AOD as a key variable in the analysis of air quality and regional climate dynamics in Brazil. The findings reinforce the importance of monitoring strategies and emission control policies, especially in the face of growing anthropogenic pressures and ongoing climate change.

Keywords: atmospheric aerosols; statistical analyses; reanalysis; climate variability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Ilustração das principais fontes de partículas de aerossol para a atmosfera, elaborado por Andreae e Rosenfeld (2007). Aerossóis primários estão representados em vermelho e os secundários em azul..... 18
- Figura 2 – Esquema representativo da distribuição vertical dos aerossóis na troposfera e seus efeitos sobre os processos radiativos e dinâmicos da atmosfera, elaborado por HUỠNH e MCNEILL, 2024. 21
- Figura 3 – Esquema dos fluxos de água, energia e partículas entre a biosfera e a atmosfera, que evidenciam um forte acoplamento entre esses sistemas, como demonstrado por Barth et al. (2005). 24
- Figura 4 - Localização dos sítios experimentais utilizados para mensurar a Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) pertencentes ao AERONET (Aerosol Robotic Network), utilizadas como referência para avaliar as estimativas dos dados da Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil..... 30
- Figura 5 - Total de anos disponíveis dos dados das estações da Aerosol Robotic Network (AERONET), utilizadas para validar as estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) provenientes do produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil..... 31
- Figura 6 - Série temporal da Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) medido pelas estações da Aerosol Robotic Network (AERONET) (A) e estimados pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) (B), entre os anos de 2004 e 2022, no Brasil. 35
- Figura 7 - Valores médios mensais de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) \pm intervalo de confiança (IC) medido pelas estações da Aerosol Robotic Network (AERONET) e estimados pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil. A área sombreada indica o período seco de cada sítio analisado. 36
- Figura 8 - Regressão linear entre a Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) medida pela AERONET e estimada pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil. Os sítios considerados foram: Alta Floresta (A), Ji-Paraná (B), Rio Branco (C), São Paulo-EACH (D), São Paulo (E), Cuiabá (F), São Martinho (G), Petrolina (H), Campo Grande (I), Manaus (J), Itajubá (K) e ATTO (L). 38
- Figura 9 - Distribuição média mensal da Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) estimados pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil. 40
- Figura 10 - Localização da área de estudo, destacando a distribuição espacial dos biomas Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal. 45
- Figura 11 - Boxplots (A) e séries temporais (B) das estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e Temperatura do ar (Tar), estimadas pelo Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil..... 50
- Figura 12 - Correlação entre as estimativas anuais de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a Temperatura do ar (Tar) em diferentes níveis de pressão atmosférica no Brasil. A cor azul representa correlação negativa e vermelho representa

correlação positiva. As regiões pontilhadas representam valores estatisticamente significativos ($p < 0,05$). 51

Figura 13 - Correlação entre as estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a Temperatura do ar (Tar) nas estações de Verão (A, B e C), Outono (D, E e F), Inverno (G, H e I) e primavera (J, K e L). A cor azul representa correlação negativa e vermelho representa correlação positiva. As regiões pontilhadas representam valores estatisticamente significativos ($p < 0,05$). 54

Figura 14 - Gráfico de dispersão entre as estimativas anuais de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a Temperatura do ar (Tar) na Amazônia (A, B e C), Caatinga (D, E e F), Cerrado (G, H e I), Mata Atlântica (J, K e L), Pampa (M, N e O) e Pantanal (P, Q e R). 56

Figura 15 - Tendências sazonais nas estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a Temperatura do ar (Tar) durante as estações de Verão, Outono, Inverno e primavera. A cor azul representa correlação negativa e vermelho representa correlação positiva. As regiões pontilhadas representam valores estatisticamente significativos ($p < 0,05$). 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estações secas e chuvosas para cada sítio analisado para avaliar as estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) provenientes do produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil. 32

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos para a Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) medida pela AERONET e estimada pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Os parâmetros incluem: índice de correlação de Pearson "r", índice "d" de Willmott, Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE) e o Percentual de Viés (PBIAS). As correlações com *** indicam nível de significância de $p < 0,001$ 37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AERONET - Aerosol Robotic Network

AOD - Aerosol Optical Depth

AOD_BC - Profundidade Óptica de Aerossóis do Carbono Negro

AOD_SULF - Profundidade Óptica de Aerossóis de Sulfato

AOD_TOTAL - Profundidade Óptica de Aerossóis da Coluna Total

ATTO - Amazon_ATTO_Tower

CAMS - Copernicus Atmosphere Monitoring Service

CCNs - núcleos de condensação de nuvens

DJF - dezembro, janeiro e fevereiro

EAE - Expoente de Extinção Ångström

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EOS - Sistema de Observação da Terra

IC - intervalo de confiança

IFS - Integrated Forecasting System

JJA - junho, julho e agosto

MAM - março, abril e maio

M_d - Mediana

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

PBIAS - Percentual de Viés

RMSE - Erro Médio Quadrático

SON - setembro, outubro e novembro

Tar - Temperatura do ar

Var - Variância

VIIRS - Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	16
1.1. Objetivo Geral	17
1.2. Objetivos Específicos	17
1.3. Hipótese	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Aerossóis Atmosféricos.....	18
2.2. Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD)	19
2.3. Distribuição Vertical dos Aerossóis	20
2.4. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)	22
2.5. Relação Entre Aerossóis E Clima	23
2.6. Aerossóis E Temperatura do Ar	25
3. ARTIGO 01: AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE ÓPTICA DOS AEROSSÓIS (AOD) ESTIMADA PELO PRODUTO COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE (CAMS) NO BRASIL	27
3.1. Introdução	28
3.2. Material e Métodos	29
3.2.1. Área de Estudo	29
3.2.2. Dados Medidos	30
3.2.3. Dados Estimados	31
3.2.4. Análise Dos Dados	31
3.3. Resultados e Discussão	33
3.4. Conclusão	40
4. ARTIGO 02: TENDÊNCIAS SAZONAIS E A RELAÇÃO ENTRE AEROSSÓIS E A TEMPERATURA DO AR EM DIFERENTES NÍVEIS DA ATMOSFERA NO BRASIL	42
4.1. INTRODUÇÃO	43
4.2. Material e Métodos	44
4.2.1. Área de Estudo	44
4.2.2. Dados	45
4.2.3. Análise das Estimativas	46
4.2.4. Segmentação Vertical e Espacial.....	47
4.3. Resultados e Discussão	48
4.3.1. Variabilidade Sazonal da AOD e Tar	48
4.3.2. Influências da AOD na Tar em Diferentes Níveis de Pressão Atmosférica	50

4.3.3.	Influências Sazonais da AOD na Tar	52
4.3.4.	Tendências Sazonais nas estimativas de AOD e Tar.....	57
4.4.	Conclusão	58
5.	CONCLUSÃO GERAL	60
	REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO GERAL

Os aerossóis atmosféricos são partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, com origem tanto natural quanto antrópica, capazes de influenciar diversos processos climáticos e ambientais (LI et al., 2022). Essas partículas desempenham papel crucial no balanço de energia do planeta, uma vez que interagem diretamente com a radiação solar (por meio de absorção e espalhamento) e indiretamente, ao modificarem propriedades microfísicas das nuvens, com efeitos expressivos sobre a temperatura do ar, a precipitação e a dinâmica atmosférica regional (SU et al., 2024).

No Brasil, a ocorrência de queimadas sazonais, o crescimento urbano e a atividade industrial agravam a emissão de aerossóis, tornando o estudo de seus impactos climáticos ainda mais relevante (PIVELLO et al., 2021). Entre os parâmetros utilizados para quantificar a carga de aerossóis na atmosfera, destaca-se a Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD), que representa a atenuação da radiação solar causada pela presença dessas partículas ao longo de uma coluna atmosférica (GARRIGUES et al., 2022).

O monitoramento da AOD é fundamental para compreender a distribuição e a intensidade dos aerossóis, sendo possível por meio de sensoriamento remoto e produtos de reanálise atmosférica (GARRIGUES et al., 2022). Nesse contexto, o Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) surge como uma das principais fontes de dados globais e regionais sobre a composição atmosférica, oferecendo estimativas contínuas e historicamente consistentes de AOD com cobertura para todo o território brasileiro (GARRIGUES et al., 2022). A avaliação da influência dos aerossóis sobre a temperatura do ar é especialmente relevante para regiões tropicais, onde a convecção e a cobertura de nuvens são altamente sensíveis à presença de partículas em suspensão, podendo ocorrer tanto o resfriamento da superfície quanto o aquecimento da troposfera em função do tipo de aerossol predominante (LIU et al., 2020).

Neste estudo, busca-se relacionar dados de AOD fornecidos pelo CAMS com estimativas de temperatura do ar, com o intuito de investigar padrões de correlação, anomalias sazonais e tendências climáticas no Brasil. Assim, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência dos aerossóis atmosféricos na temperatura do ar no Brasil, a partir da análise das estimativas de AOD fornecidas pelo CAMS, considerando suas variações espaciais e tendências sazonais.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência dos aerossóis atmosféricos na temperatura do ar no Brasil, por meio das estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) fornecidas pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), considerando suas variações espaciais e tendências sazonais.

1.2. Objetivos Específicos

- i. Validar as estimativas da Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) provenientes do produto Copernicus Atmosphere Monitoring service (CAMS) no Brasil;
- ii. Analisar as influências de aerossóis atmosféricos na temperatura do ar e suas tendências sazonais no Brasil.

1.3. Hipótese

A variabilidade espacial e temporal da concentração de aerossóis atmosféricos, representada pela Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD), está associada a alterações significativas na temperatura do ar nas diferentes regiões do Brasil, promovendo padrões distintos de aquecimento ou resfriamento em função da composição dos aerossóis e das características climáticas regionais.

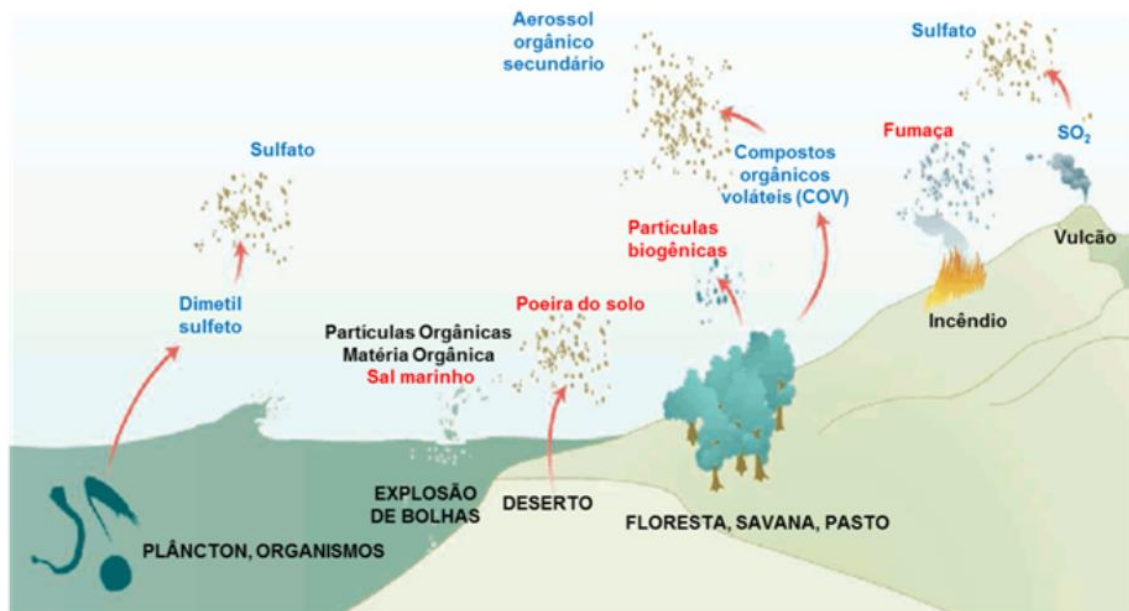
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aerossóis Atmosféricos

Os Aerossóis atmosféricos são partículas líquidas ou sólidas em suspensão na atmosfera. Essas partículas desempenham um papel fundamental no sistema climático, influenciando tanto os processos radiativos quanto a microfísica das nuvens (LI et al., 2022). Os aerossóis podem ter origem natural, como é o caso da poeira mineral, sal marinho, erupções vulcânicas e aerossóis biogênicos, ou origem antrópica, como os provenientes da queima de biomassa, emissões industriais e de veículos (IPCC, 2021).

A composição química dos aerossóis é altamente variável e depende da sua fonte (Figura 1). Aerossóis carbonáceos, como o carbono negro e o carbono orgânico, são comuns em regiões afetadas por queimadas e urbanização (BUDHAVANT et al., 2024). Já os aerossóis sulfatos são comumente associados à queima de combustíveis fósseis e processos industriais (BOND et al., 2013). A diversidade de composição afeta diretamente as propriedades ópticas, higroscópicas e reativas das partículas, e, por consequência, sua interação com o clima e a saúde humana.

Figura 1 – Ilustração das principais fontes de partículas de aerossol para a atmosfera. Aerossóis primários estão representados em vermelho e os secundários em azul.



Fonte: ANDREA E e ROSENFELD (2007).

Os aerossóis têm tempo de permanência relativamente curto na atmosfera, de poucos dias a semanas, sendo transportados por correntes atmosféricas e depositados por precipitação ou sedimentação (LI et al., 2025). Ainda assim, sua influência climática é significativa, sobretudo

em escalas regionais, onde podem modificar padrões de temperatura, cobertura de nuvens e precipitação (LIU et al., 2020). As regiões tropicais, como o Brasil, são particularmente sensíveis devido à combinação de fontes naturais e antrópicas ativas ao longo de todo o ano.

Além do papel climático, aerossóis têm efeitos sobre a saúde humana, principalmente os de menor diâmetro, que podem penetrar profundamente nos pulmões e atingir a corrente sanguínea (LELIEVELD et al., 2015). Em contextos urbanos e de queimadas, a exposição prolongada a tais partículas está associada ao aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares, além de impactos cognitivos (LELIEVELD et al., 2015). Compreender a natureza e a dinâmica dos aerossóis é essencial para a formulação de políticas públicas ambientais e climáticas, principalmente em países tropicais como o Brasil, onde a variabilidade natural e antrópica das fontes é elevada. A caracterização desses aerossóis é o ponto de partida para compreender seus impactos sobre variáveis meteorológicas e climáticas, como a temperatura do ar.

2.2. Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD)

A Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) é uma medida quantitativa que expressa a atenuação da radiação solar incidente devido à presença de partículas em suspensão na atmosfera (GARRIGUES et al., 2022). Trata-se de um parâmetro adimensional que representa a integral da extinção óptica ao longo de uma coluna atmosférica vertical (GARRIGUES et al., 2022). Em termos práticos, quanto maior a AOD, maior a quantidade de aerossóis presente, e menor a transparência da atmosfera à luz solar.

A medição de AOD é fundamental para avaliar a carga de aerossóis em uma determinada região. Isso pode ser feito com precisão por meio de sensores de radiação em solo, como os fotômetros solares da rede AERONET, e sensores remotos embarcados em satélites, como o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e o VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) (PEDREIRA JÚNIOR et al., 2025). A combinação entre essas fontes fornece uma base robusta de dados para análise regional e global.

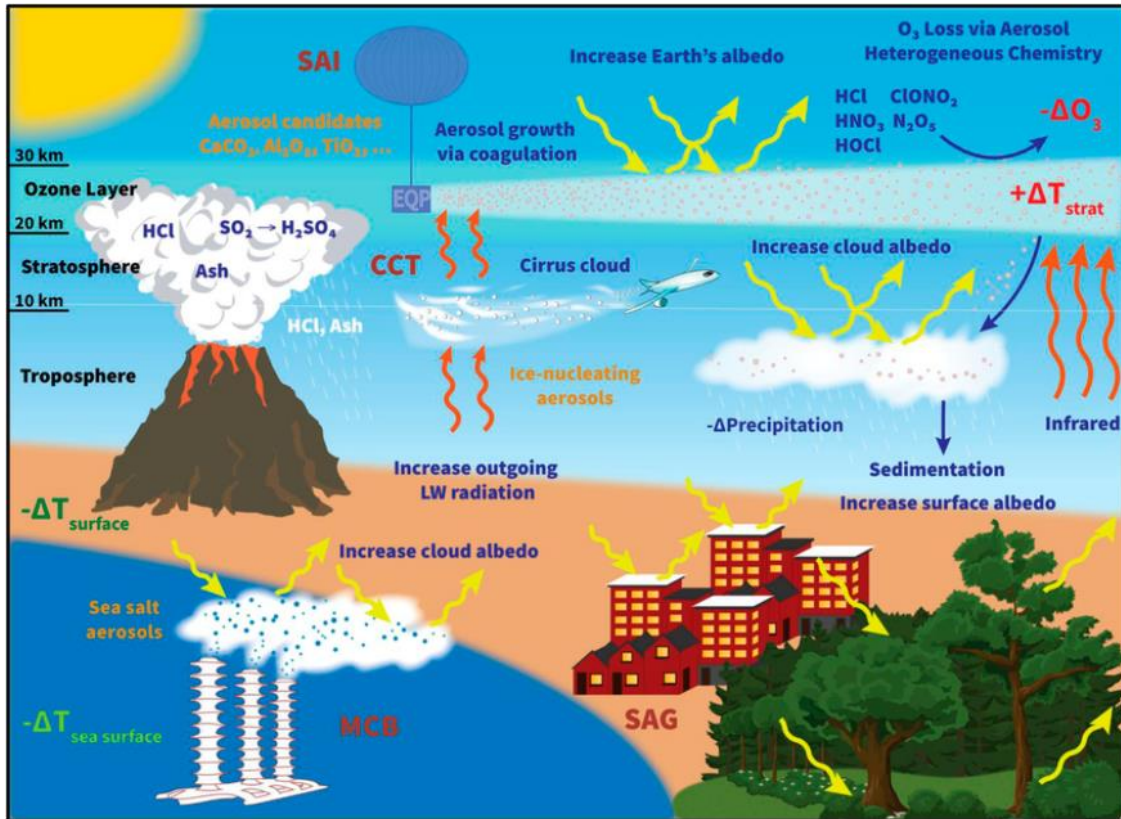
A AOD é sensível a diversas características dos aerossóis, como tamanho, composição, índice de refração e umidade. Portanto, sua interpretação deve ser feita com cuidado, considerando as limitações instrumentais e os processos físicos que influenciam os valores medidos (JIN et al., 2023). Regiões tropicais com alta umidade relativa, por exemplo, pode apresentar AOD elevada mesmo com concentrações moderadas de partículas, devido à higroscopia dos aerossóis (JIN et al., 2023).

No Brasil, o monitoramento da AOD tem se tornado cada vez mais importante, sobretudo em áreas impactadas por queimadas sazonais, como a Amazônia, e regiões urbanas com elevada emissão de poluentes. Os valores de AOD nessas áreas variam sazonalmente e estão fortemente associados à atividade antrópica, como uso de fogo no manejo agrícola e emissões veiculares (GAVIDIA-CALDERÓN et al., 2024). Como indicador integrado da carga de aerossóis, a AOD tem ampla aplicação na modelagem climática e na avaliação de impactos atmosféricos. Estudos recentes têm utilizado esse parâmetro para estabelecer correlações com variáveis meteorológicas, como temperatura, irradiância e cobertura de nuvens, fortalecendo sua importância como ferramenta para entender os efeitos dos aerossóis no sistema climático terrestre (LIU et al., 2020; YAMAGAMI et al., 2022; LI et al., 2022; TORABI et al., 2024).

2.3. Distribuição Vertical dos Aerossóis

A distribuição vertical dos aerossóis na atmosfera é um fator determinante para a forma como esses elementos interagem com a radiação solar, com as nuvens e com os processos dinâmicos atmosféricos (Figura 2). Diferentes perfis verticais resultam em impactos distintos sobre o balanço radiativo e a estabilidade da coluna atmosférica (KOCH e DEL GENIO, 2010). Por exemplo, aerossóis absorvedores presentes nas camadas médias e superiores da troposfera podem aquecer essas camadas e, simultaneamente, reduzir a radiação que atinge a superfície, promovendo o chamado efeito semi-direto, caracterizado pela supressão da convecção e da formação de nuvens (KOREN et al., 2004).

Figura 2 – Esquema representativo da distribuição vertical dos aerossóis na troposfera e seus efeitos sobre os processos radiativos e dinâmicos da atmosfera, elaborado por HUỠNH e MCNEILL, 2024.



Fonte: HUỠNH e MCNEILL, 2024.

O comportamento vertical dos aerossóis está fortemente ligado à sua origem. Aerossóis de origem urbana e industrial tendem a se concentrar nas camadas mais próximas à superfície, enquanto partículas geradas por queimadas ou transportadas por longas distâncias, como a poeira do Saara, podem alcançar altitudes superiores a 5 km (YU et al., 2022). No Brasil, eventos de queimadas na Amazônia frequentemente resultam em colunas de fumaça que se estendem até a média troposfera, alterando o perfil de temperatura e impactando a formação de nuvens profundas convectivas (ANDREAE et al., 2004).

A variação sazonal também influencia a distribuição vertical dos aerossóis. Durante a estação seca, a convecção reduzida e a maior estabilidade atmosférica favorecem o acúmulo de partículas em camadas mais altas, enquanto na estação chuvosa a dispersão vertical é intensificada, levando à maior deposição úmida (ARTAXO et al., 2013). Além disso, o perfil vertical dos aerossóis é um elemento-chave em modelos de clima e previsão do tempo, pois influencia diretamente o aquecimento diferencial da atmosfera, a estabilidade da coluna e os ciclos hidrológicos regionais.

2.4. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)

O Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) é um programa europeu coordenado pelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), que fornece informações contínuas sobre a composição atmosférica em escala global (INNESS et al., 2019). Utilizando uma combinação de modelos numéricos avançados e dados de satélite, o CAMS disponibiliza estimativas diárias de parâmetros atmosféricos, como gases traços, ozônio, partículas em suspensão e, particularmente, a profundidade óptica dos aerossóis (AOD) (INNESS et al., 2019).

O sistema de reanálise do CAMS é baseado no modelo IFS (Integrated Forecasting System), que incorpora dados observacionais em tempo quase real por meio de assimilação de dados. Isso permite gerar informações consistentes e comparáveis ao longo do tempo e do espaço, com resolução espacial de até 40 km (INNESS et al., 2019; GARRIGUES et al., 2022). As séries temporais de AOD do CAMS abrangem desde 2003, sendo fundamentais para análises de tendências e eventos extremos relacionados à poluição atmosférica.

No contexto brasileiro, o CAMS representa uma fonte valiosa de dados, especialmente para áreas remotas com escassa cobertura de estações de monitoramento em solo (VILLARDI et al., 2023). Regiões da Amazônia, do Cerrado e do Centro-Oeste brasileiro têm sido objeto de estudos utilizando dados do CAMS, especialmente para investigar os impactos de queimadas na qualidade do ar e no clima regional (VILLARDI et al., 2023).

Entretanto, é importante considerar as limitações desses produtos. Como todo sistema de reanálise, o CAMS depende da densidade e da qualidade das observações assimiladas, o que pode introduzir incertezas em áreas com baixa cobertura de dados *in situ* (GUEYMARD e YANG, 2020). Além disso, a identificação do tipo de aerossol é feita com base em classificações espectrais e modelos prévios, podendo gerar classificações imprecisas em ambientes complexos como o Brasil (GUEYMARD e YANG, 2020). Ainda assim, o CAMS é amplamente utilizado na pesquisa climática e ambiental, por fornecer dados integrados, consistentes e acessíveis. Sua aplicabilidade para estudos sobre a relação entre aerossóis e variáveis climáticas, como temperatura do ar, o torna uma ferramenta estratégica para pesquisadores interessados na dinâmica atmosférica do Brasil e de outras regiões tropicais (WAGNER et al., 2021).

A validação dos dados do CAMS é essencial para assegurar sua aplicabilidade em estudos ambientais, meteorológicos e climáticos. Para isso, diferentes abordagens têm sido utilizadas, como a comparação com medições *in situ* (estações terrestres), dados de satélite independentes e redes globais de observação, como a Aerosol Robotic Network (AERONET). Segundo Gueymard

e Yang (2020), os produtos de profundidade óptica dos aerossóis (AOD) do CAMS apresentam boa correlação com os dados da AERONET em diversas regiões do mundo, embora diferenças regionais e sazonais possam ser observadas devido a fatores como cobertura de nuvens, composição do aerossol e limitações dos algoritmos de assimilação.

Adicionalmente, os produtos do CAMS vêm sendo validados em múltiplos contextos geográficos. Eskes et al. (2015) em uma análise global, destacaram que a precisão da AOD pode variar de acordo com a densidade de estações de observação assimiladas, sendo mais confiável em regiões com ampla cobertura de dados. Fu et al. (2022) compararam a irradiância em céu limpo estimada pelo CAMS com dados observacionais e apontaram que as reanálises apresentam melhor desempenho em latitudes médias, com limitações em regiões tropicais devido à maior variabilidade atmosférica. A versão mais recente da reanálise global do CAMS (EAC4 – ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4) vem incorporando melhorias nos esquemas de assimilação e representação das propriedades dos aerossóis, o que tem contribuído para reduzir erros sistemáticos e melhorar a acurácia das estimativas (Garrigues et al., 2022).

2.5. Relação Entre Aerossóis E Clima

Os aerossóis exercem influência significativa sobre o clima por meio de mecanismos diretos, semi-diretos e indiretos (BELLOUIN et al., 2020). O efeito direto envolve a interação entre partículas e a radiação solar, seja por reflexão (espalhamento) ou absorção (LI et al., 2022). Aerossóis do tipo escurecedores, como o carbono negro, absorvem radiação solar, aquecendo as camadas atmosféricas superiores e reduzindo a radiação incidente na superfície (BUDHAVANT et al., 2024). Já os aerossóis claros, como os sulfatos, aumentam a albedo atmosférico e promovem resfriamento local (BOND et al., 2013).

O efeito semi-direto decorre da alteração da estabilidade atmosférica, devido ao aquecimento diferencial das camadas superiores, o que pode suprimir a convecção e, conseqüentemente, a formação de nuvens (KOREN et al., 2004). Isso é particularmente relevante em regiões tropicais onde a convecção é o principal mecanismo de formação de chuvas. A presença de aerossóis pode, portanto, afetar não apenas a radiação, mas também a dinâmica vertical da atmosfera.

No efeito indireto, os aerossóis atuam como núcleos de condensação de nuvens (CCNs), modificando o tamanho, a concentração e a vida útil das gotas de nuvem. O aumento da concentração de CCNs pode resultar em nuvens mais brilhantes e duradouras, com potencial redução da precipitação (efeitos de Twomey e Albrecht) (TWOMEY, 1977; ALBRECHT, 1989).

propriedades ópticas e variáveis meteorológicas (ZHAO et al., 2011; LIU et al., 2020; PALÁCIOS et al., 2024; DA SILVA et al., 2025).

Adicionalmente, os fenômenos El Niño e La Niña, fases opostas da Oscilação Sul (ENSO), exercem papel crucial na variabilidade climática interanual e influenciam diretamente a dinâmica atmosférica sobre a América do Sul. No Brasil, e particularmente nas regiões amazônica e centro-oeste, esses fenômenos modulam padrões de temperatura, precipitação e ocorrência de queimadas, afetando substancialmente a concentração de aerossóis na atmosfera. Durante episódios de El Niño, há uma tendência de redução das chuvas na Amazônia, o que favorece o aumento da frequência e intensidade de queimadas e, por consequência, eleva a concentração de partículas atmosféricas, sobretudo o carbono negro. Essa maior carga de aerossóis intensifica os efeitos radiativos, alterando o balanço de energia de superfície e influenciando os padrões térmicos regionais. Por outro lado, eventos de La Niña estão associados ao aumento da precipitação, promovendo a lavagem úmida da atmosfera e reduzindo significativamente a presença de aerossóis em suspensão (Pereira et al., 2024).

2.6. Aerossóis E Temperatura do Ar

A relação entre aerossóis atmosféricos e a temperatura do ar é complexa e depende de múltiplos fatores, como a composição química dos aerossóis, suas propriedades ópticas, distribuição vertical e interação com a radiação solar (YAMAGAMI et al., 2022). Em termos gerais, os aerossóis podem exercer um efeito direto sobre a temperatura por meio da absorção e do espalhamento da radiação solar (LI et al., 2022). Aerossóis que absorvem radiação, como o carbono negro, promovem o aquecimento da atmosfera onde estão presentes, enquanto os que refletem radiação, como os sulfatos, reduzem a quantidade de energia que atinge a superfície, promovendo resfriamento superficial.

Esse resfriamento de superfície, associado à presença de aerossóis do tipo refletivo, pode diminuir a temperatura máxima do ar durante o dia. Por outro lado, o aquecimento da atmosfera média e superior, causado por aerossóis absorvedores, pode estabilizar a coluna atmosférica e inibir a formação de nuvens convectivas, alterando os ciclos locais de precipitação e, conseqüentemente, o balanço térmico regional (STJERN et al., 2020). Assim, em função do tipo e da altitude de concentração, os aerossóis podem tanto reduzir quanto aumentar a temperatura do ar em diferentes camadas da atmosfera.

Além dos efeitos diretos, os aerossóis impactam indiretamente a temperatura ao modificarem as propriedades microfísicas das nuvens (KOREN et al., 2004). A atuação como

núcleos de condensação pode resultar em nuvens mais espessas e duradouras, que aumentam a refletância da atmosfera (albedo), ampliando o resfriamento da superfície. Entretanto, esses mesmos processos podem reduzir a precipitação, permitindo o acúmulo de partículas na atmosfera e reforçando efeitos térmicos negativos sobre o solo, especialmente em ambientes urbanos.

Estudos conduzidos em regiões tropicais, como o Brasil Central e a Amazônia, evidenciam que a variabilidade sazonal de aerossóis, especialmente durante o período de queimadas, está correlacionada com alterações na temperatura do ar. Durante a estação seca, picos de AOD coincidem com redução da radiação solar incidente na superfície e, em alguns casos, com a diminuição das temperaturas máximas diurnas (ARTAXO, 2013). No entanto, o aquecimento noturno pode ser amplificado pela presença de aerossóis absorvedores, que dificultam a perda de calor por radiação, promovendo elevação da temperatura mínima.

Dessa forma, os aerossóis têm um papel importante e dinâmico na regulação da temperatura do ar. A quantificação desse impacto exige análise integrada de dados de AOD, composição dos aerossóis, variáveis meteorológicas e modelagem radiativa. No contexto brasileiro, marcado por eventos sazonais como queimadas e poluição urbana, o entendimento dessa relação é essencial para prever efeitos climáticos regionais, aprimorar modelos atmosféricos e subsidiar políticas públicas voltadas à mitigação de mudanças climáticas e à gestão da qualidade do ar.

3. ARTIGO 01: AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE ÓPTICA DOS AEROSSÓIS (AOD) ESTIMADA PELO PRODUTO COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE (CAMS) NO BRASIL.

RESUMO

A profundidade óptica dos aerossóis desempenha um papel crucial na pesquisa científica e nas políticas ambientais, possibilitando a compreensão da distribuição e extensão dos aerossóis em diversas regiões do Brasil. O objetivo deste estudo é avaliar as estimativas da Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) provenientes do produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil. O estudo abrangeu os sítios de Alta Floresta, Ji-Paraná, Rio Branco, Manaus, ATTO, São Paulo-EACH, São Paulo, Itajubá, Cuiabá, São Martinho, Petrolina e Campo Grande. Os valores medidos e estimados foram avaliados utilizando o índice de correlação de Pearson r , a precisão pelo índice "d" de Willmott, o Erro Médio Quadrático, o Erro Médio Absoluto e o Percentual de Viés. Os resultados do produto CAMS mostraram uma boa concordância com as medições da AOD da Aerosol Robotic Network. Houve uma forte correlação entre os dados, com valores de índice "d" de Willmott próximos a 1 e erros relativamente baixos. No entanto, observaram-se diferenças significativas em alguns sítios, como Ji-Paraná, Rio Branco, Manaus e ATTO, onde o CAMS tendeu a superestimar a AOD, enquanto em Petrolina houve subestimação. Ocorreram variações na AOD em várias regiões do Brasil ao longo dos anos analisados, destacando aumento durante a estação seca devido a queimadas e atividades humanas, e redução durante os meses chuvosos. As áreas mais afetadas foram aquelas próximas ao arco do desmatamento na Amazônia. As concentrações de aerossóis também foram influenciadas por fatores climáticos, atividades agrícolas, industriais e urbanas em diferentes regiões do país. Essa variabilidade destaca a complexidade dos fatores naturais e antrópicos que afetam a qualidade do ar e ressalta a importância de estratégias de controle e mitigação de emissões de aerossóis. Portanto, o CAMS demonstrou um desempenho satisfatório ao estimar a AOD no Brasil, oferecendo informações valiosas sobre as concentrações de aerossóis.

Palavras-chave: aerossóis atmosféricos; América do Sul; análises estatísticas; reanálise.

3.1. Introdução

O Brasil, com sua vasta extensão territorial e diversidade ambiental, apresenta um cenário complexo onde os aerossóis atmosféricos desempenham um papel significativo tanto nos processos climáticos quanto na qualidade do ar (PIVELLO *et al.*, 2021). Dessa forma, as florestas tropicais densas, os ecossistemas únicos, as áreas urbanas e industriais, tudo isso contribui para uma notável diversidade de fontes e tipos de aerossóis no país (BORMA *et al.*, 2022). Essas minúsculas partículas sólidas ou líquidas, provenientes tanto de atividades naturais como antrópicas, exercem um impacto significativo no equilíbrio atmosférico, afetando a radiação solar, a formação de nuvens e a ocorrência de precipitação (BELLOUIN *et al.*, 2020; DE OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Nesse sentido, a Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) assume uma relevância ímpar na pesquisa científica e nas políticas ambientais, permitindo que os cientistas e gestores compreendam a extensão e distribuição espacial dos aerossóis em diferentes regiões do Brasil (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019). A AOD é um parâmetro crucial para entender o comportamento e a distribuição de aerossóis na atmosfera (PENDHARKAR *et al.*, 2021). A AOD é uma medida da extensão da radiação solar causada pela presença de aerossóis suspensos na atmosfera (LI *et al.*, 2021). Os aerossóis são partículas microscópicas, sólidas ou líquidas, que podem ser encontradas naturalmente no ar ou sendo produzidas por atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, processos industriais e queimadas florestais (PALÁCIOS *et al.*, 2022).

No entanto, as medidas observacionais de AOD estão susceptíveis a desafios e incertezas que precisam ser cuidadosamente considerados. Contudo, as medições *in situ* podem fornecer dados precisos, mas são limitadas em termos de abrangência espacial e temporal, como é o caso da AERONET (PORFIRIO *et al.*, 2020). A AERONET é uma extensa rede global de estações de monitoramento que coletam dados de profundidade óptica de aerossóis (HOLBEN *et al.*, 1998).

Esses dados fornecem informações valiosas sobre a distribuição e concentração de partículas suspensas na atmosfera, como poeira, fumaça, poluentes e outros materiais particulados. Os dados obtidos pela AERONET são amplamente utilizados em pesquisas científicas, modelos climáticos e para fornecer informações importantes para tomadores de decisão em relação ao gerenciamento da qualidade do ar e mitigação dos efeitos dos aerossóis no ambiente terrestre (OGUNJOBI; AWOLEYE, 2019).

Por outro lado, o uso de dados de satélites e modelos de reanálises atmosféricas dispõem de estimativas em escala global e cobertura contínua, abrangendo áreas remotas e pouco

monitoradas (HANDSCHUH; ERBERTSEDER; BAIER, 2023). Neste contexto, através da combinação de dados de satélites, medições *in situ* e modelos atmosféricos, o Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) desempenha um papel crucial no fornecimento de estimativas precisas da AOD em escala global (GARRIGUES *et al.*, 2022). Desenvolvido pelo Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), a reanálise CAMS representa a mais recente compilação global de informações sobre a composição atmosférica.

Este conjunto de dados é composto por campos tridimensionais de parâmetros de composição atmosférica, incluindo aerossóis, espécies químicas e gases de efeito estufa. A obtenção desses campos é realizada através da reanálise do Global Greenhouse Gas (EGG4), que se concentra especificamente nos gases de efeito estufa em escala global. Essa abordagem multidisciplinar permite uma visão mais completa dos padrões de distribuição dos aerossóis. Embora o CAMS tenha sido amplamente utilizado em diversas regiões do mundo, a avaliação de sua confiabilidade no contexto brasileiro ainda é escassa (ASUTOSH *et al.*, 2022; DAHAL *et al.*, 2022; FU *et al.*, 2022; GARRIGUES *et al.*, 2022; INNESS *et al.*, 2019; WILLIAMS *et al.*, 2022; WU; LI; BAI, 2020).

Portanto, dada a vasta extensão territorial do Brasil, sua diversidade ecológica e ambiental e as fontes de emissão de aerossóis presentes no país, é fundamental investigar a precisão das estimativas do CAMS em relação à AOD no território brasileiro. Essa avaliação permitirá identificar discrepâncias entre as estimativas do CAMS e os dados observacionais, além de fornecer insights valiosos para o aprimoramento do monitoramento da qualidade do ar (GARRIGUES *et al.*, 2022). Assim, o objetivo deste estudo é avaliar as estimativas da Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) provenientes do produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil.

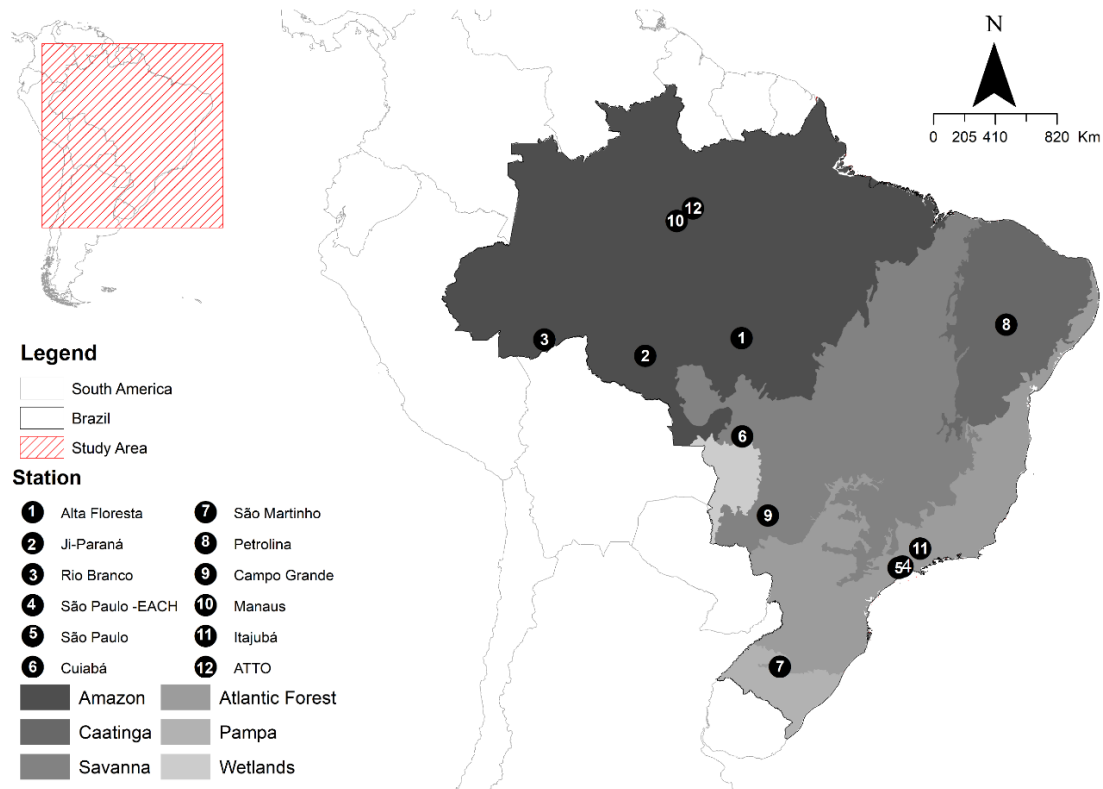
3.2. Material e Métodos

3.2.1. Área de Estudo

O estudo abrangeu vários pontos de coletas pertencentes ao Aerosol Robotic Network (AERONET) distribuídos em diferentes regiões do Brasil, cada um inserido em um bioma específico (Figura 4). Destacam-se i) Bioma Amazônico, representado pelos sítios de Alta_Floresta (Alta Floresta), Ji-Parana_SE (Ji-Paraná), Rio_Branco (Rio Branco), Manaus_Embrapa (Manaus) e Amazon_ATTO_Tower (ATTO); ii) Bioma Mata Atlântica com

os sítios São Paulo–EACH (SP-EACH) (4), São_Paulo (São Paulo) e Itajuba (Itajubá), localizados no sudeste do país; iii) Bioma Pantanal com o sítio Cuiabá-Miranda (Cuiabá); iv) Bioma Pampa com o sítio São_Martinho_Sonda (São Martinho); v); Bioma Caatinga com o sítio Petrolina_Sonda (Petrolina) e vi) Bioma Cerrado com o sítio Campo_Grande_Sonda (Campo Grande) (Figura 4).

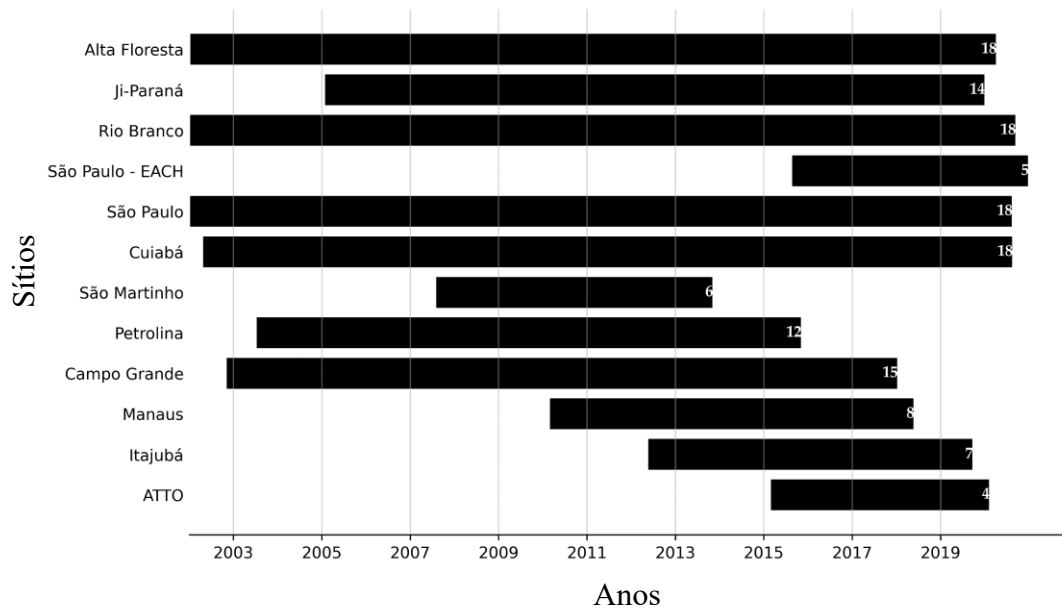
Figura 4 - Localização dos sítios experimentais utilizados para mensurar a Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) pertencentes ao AERONET (Aerosol Robotic Network), utilizadas como referência para avaliar as estimativas dos dados da Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil.



3.2.2. Dados Medidos

Os dados de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD), foram coletados por estações de monitoramento entre os anos de 2003 e 2021 (18 anos) (Figura 5). Estes dados de referência são pertencentes ao projeto Aerosol Robotic Network (AERONET), os quais estão disponibilizados através do Sistema de Observação da Terra (EOS) da NASA (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

Figura 5 - Total de anos disponíveis dos dados das estações da Aerosol Robotic Network (AERONET), utilizadas para validar as estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) provenientes do produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil.



Neste estudo, priorizou-se o uso de dados de nível 2.0 da Rede AERONET, que representa o mais alto nível de qualidade (HOLBEN *et al.*, 1998). Esses dados passam por um rigoroso protocolo de garantia de qualidade, incluindo correções de fatores locais, garantindo sua confiabilidade (PALÁCIOS *et al.*, 2022). A análise da AOD, foi feita para as medições realizadas em 500 nm. A comparação direta dos dados de AOD da AERONET com a AOD proveniente do produto CAMS, foi feita após a conversão, dos valores de AOD da AERONET, de 500 nm para 550 nm, o qual foi utilizado o Expoente de Extinção Ångström (EAE) na faixa espectral de 440-870 nm (Equação 1).

$$AOD_{550 \text{ nm}} = AOD_{500 \text{ nm}} \left(\frac{550}{500} \right)^{-EAE} \quad (1)$$

3.2.3. Dados Estimados

Dados de reanálise provenientes do Produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), o qual fornece informações sobre a estimativa da Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) foram utilizados. O CAMS possui resolução espacial de ~80 km e é composto por campos tridimensionais de parâmetros de composição atmosférica, incluindo aerossóis (<https://atmosphere.copernicus.eu/>).

3.2.4. Análise Dos Dados

Os dados de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) foram analisados com base em médias, juntamente com os intervalos de confiança de $\pm 95\%$, usando a técnica de reamostragem bootstrap com 1000 iterações. As estimativas de AOD (CAMS) foram desconsideradas quando ocorreram falhas no registro da AOD medida (AERONET). As estações seca e chuvosa de cada sítio foram analisadas de acordo com a tabela (1).

Tabela 1 - Estações secas e chuvosas para cada sítio analisado para avaliar as estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) provenientes do produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil.

Estação	Período		Referência
	Seco	Chuvoso	
Alta Floresta	Julho/outubro	Novembro/junho	Pereira <i>et al.</i> , 2022
Ji-Paraná	Abril/setembro	Outubro/março	De Sales <i>et al.</i> , 2020
Rio Branco		Setembro/maio	Duarte, 2005
São Paulo-EACH	Junho/agosto	Setembro/maio	Giulio <i>et al.</i> , 2019
São Paulo			
Cuiabá	Mai/setembro	Outubro/abril	Machado <i>et al.</i> , 2016
São Martinho	Outubro/abril	Mai/setembro	Rodrigues <i>et al.</i> , 2023
Petrolina	Mai/outubro	Novembro/abril	Prado e Coelho, 2017
Campo Grande	Abril/setembro	Outubro/março	Souza <i>et al.</i> , 2022
Manaus	Julho/setembro	Novembro/junho	Espinoza <i>et al.</i> , 2023
ATTO			
Itajubá	Abril/setembro	Outubro/março	Alves <i>et al.</i> , 2020

Os valores medidos (AERONET) e estimados (CAMS) foram relacionados por meio do índice de correlação de Pearson "r" (Equação 2) (PEARSON *et al.*, 1994), pela análise da precisão índice "d" de Willmott (Equação 3) (WILLMOTT *et al.*, 1985), que compara a distância dos valores estimados com os valores medidos e varia de 0 a 1, indicando nenhuma correspondência e correspondência perfeita, respectivamente.

O Erro Médio Quadrático - RMSE (Equação 4), também foi analisado para indicar falhas no modelo ao comparar os valores estimados com os medidos, enquanto o Erro Médio Absoluto - MAE (Equação 5) indica a média absoluta das distâncias (desvios) entre os valores estimados e medidos. Ambos os erros devem se aproximar de zero para indicar maior precisão das estimativas. O Percentual de Viés (PBIAS) proposto por Gupta *et al.* (2006) foi utilizado para avaliar a diferença entre os valores estimados e os valores medidos, indicando se o CAMS superestima

(PBIAS positivo) ou subestima (PBIAS negativo) os dados medidos pela AERONET. Uma relação de 1 para 1 é caracterizada por um PBIAS de 0,0% (Equação 6).

$$r = \frac{\sum(CAMS_{(i)} - CAMS)(AERONET_{(i)} - AERONET)}{\sqrt{\sum(CAMS_{(i)} - CAMS)^2 \sum(AERONET_{(i)} - AERONET)^2}} \quad (2)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(CAMS_{(i)} - AERONET_{(i)})^2}{\sum(|CAMS_{(i)} - AERONET| + |AERONET_{(i)} - AERONET|)^2} \right] \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(CAMS_{(i)} - AERONET_{(i)})^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAE = \sum \frac{|CAMS_{(i)} - AERONET_{(i)}|}{n} \quad (5)$$

$$PBIAS = \frac{\sum(CAMS_{(i)} - AERONET_{(i)})^2}{\sum AERONET_{(i)}} \times 100 \quad (6)$$

Em que, $CAMS_{(i)}$ são os valores estimados, $AERONET_{(i)}$ os valores medidos, n a quantidade de dados, $AERONET$ e $CAMS$ as médias dos valores medidos e estimados, respectivamente.

3.3. Resultados e Discussão

Os maiores valores de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) ocorreram em Alta Floresta e Ji-Paraná ($AERONET= 2,02$ e $CAMS= 2,24$), respectivamente (Figura 6). Durante a estação seca, é notável um aumento significativo na AOD média em várias regiões do sul da Amazônia (ROCHA; YAMASOE, 2013), principalmente nos sítios que estão localizados ou próximos ao arco do desmatamento, como Alta Floresta e Ji-Paraná. Esse aumento substancial é atribuído principalmente às emissões regionais resultantes da queima de biomassa, bem como ao transporte de aerossóis provenientes de áreas distantes (MORAIS *et al.*, 2022; PALÁCIOS *et al.*, 2022). Além disso, a região central da Amazônia é influenciada pelo ramo descendente da célula de Hadley, o que ocasiona condições de estiagem, favorecendo a concentração de aerossóis na atmosfera (ROCHA; YAMASOE, 2013).

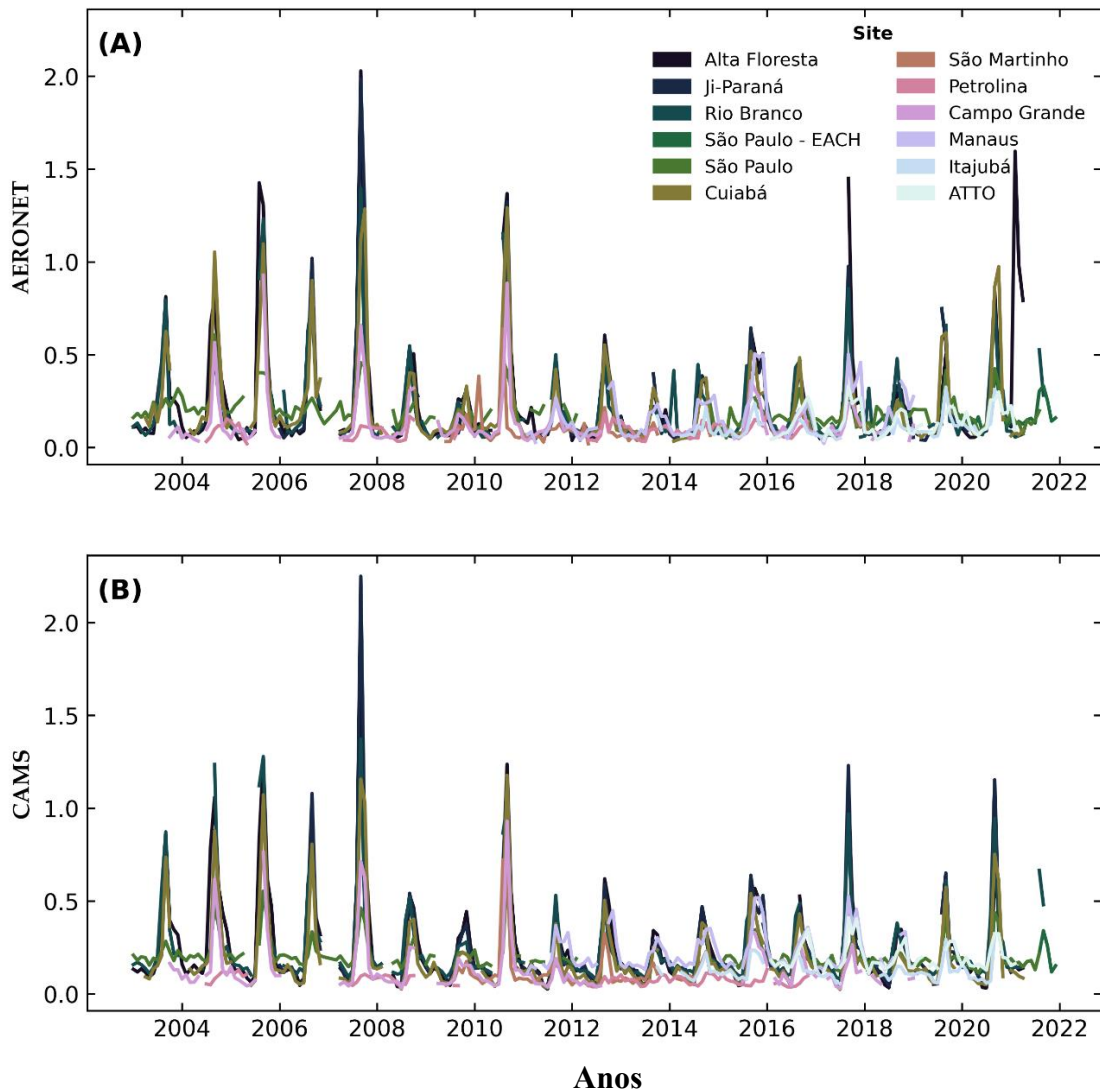
Os valores de AOD foram os menores durante a estação chuvosa em Manaus e Cuiabá ($AERONET$ e $CAMS= 0,02$), que provavelmente está relacionada somente às emissões urbanas das cidades, como usinas termelétricas próximas ao local. Os maiores valores de AOD foram

observados pela AERONET e pelo CAMS no ano de 2007. É importante destacar que segundo Lizundia et al. (2020), uma das maiores áreas queimadas detectadas na América do Sul foi em 2007 no Brasil, Paraguai e Colômbia. De 2004 a 2008, houve uma tendência consistente de aumento na AOD (Figura 6).

Além disso, durante o período de 2008 a 2016, observa-se uma tendência de redução e estabilidade na concentração de aerossóis, exceto por um aumento notável em 2011, observado principalmente nos sítios localizados na região sul e sudeste. Esse ano em específico foi mais seco nestas regiões, condicionado pelo fenômeno La Nina, o qual favoreceu descontrole de desmatamentos de grandes áreas e incêndios que ocorreram principalmente em pastagens (DE ANDRADE *et al.*, 2020). A partir de 2017, os dados indicam uma tendência clara de aumento na concentração de aerossóis novamente, ocorrido principalmente nos biomas Amazônia e Cerrado (Figura 6). Estes foram responsáveis por 86% das emissões de material particulado total no Brasil de 2003 a 2020 (PEREIRA, G. *et al.*, 2022).

Dessa forma, é evidente a variabilidade da AOD ao longo dos anos, a qual pode ser influenciada por diferentes taxas de precipitação, fenômenos meteorológicos de grande escala, como El Niño e La Niña, e pelas políticas governamentais de manejo do desmatamento (DE ANDRADE *et al.*, 2020). Essa variabilidade reflete a complexidade dos fatores naturais e antrópicos que afetam as concentrações de aerossóis atmosféricos nos sítios analisados, e destaca a importância de considerar esses aspectos ao interpretar os resultados e implementar estratégias de controle e mitigação das emissões de aerossóis (MARENGO; ESPINOZA, 2016).

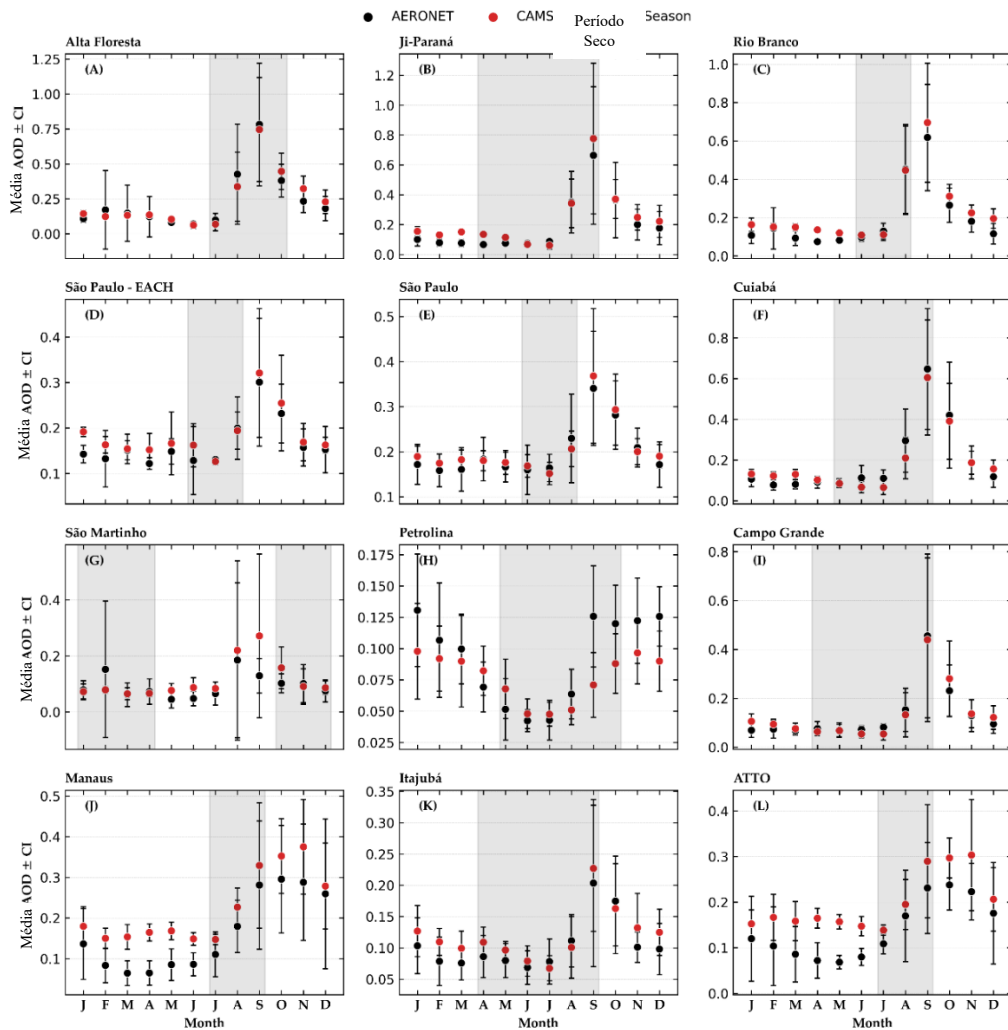
Figura 6 - Série temporal da Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) medido pelas estações da Aerosol Robotic Network (AERONET) (A) e estimados pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) (B), entre os anos de 2004 e 2022, no Brasil.



Os sítios de Alta Floresta, São Paulo, Cuiabá, São Martinho, Petrolina, Campo Grande e Itajubá, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as estimativas do CAMS e as medidas da AERONET (Figura 7). Porém, nos demais sítios, como Ji-Paraná, Rio Branco, Manaus, São Paulo (EACH) e ATTO foram observadas diferenças significativas com as medidas da AERONET em determinados meses do ano. Em março, Rio Branco registrou uma superestimativa de 66% (Figura 7). Já em Manaus, as superestimativas ocorreram entre março e junho, com valores variando de 75% a 166%. A ATTO também apresentou superestimativas durante os meses de abril a junho, com uma faixa de variação de 75% a 128% (Figura 7). As estimativas de AOD do CAMS são fortemente limitadas durante a assimilação dos dados terrestres e de satélite (GUEYMARD; YANG, 2020). Além disso, a alta ocorrência de aglomerados de

nuvens cúmulos na Amazônia provavelmente afetou as detecções de AOD, influenciando a superestimativa das estimativas nesses sítios (PEREIRA, G. *et al.*, 2022).

Figura 7 - Valores médios mensais de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) \pm intervalo de confiança (IC) medido pelas estações da Aerosol Robotic Network (AERONET) e estimados pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil. A área sombreada indica o período seco de cada sítio analisado.



Os resultados apresentaram uma forte correlação (indicada por *** com nível de significância de $p < 0,001$) entre as medições da AERONET e as estimativas do produto CAMS em grande parte dos sítios avaliados. Além disso, ao analisar os índices de concordância, representados pelo índice "d" de Willmott, constatou-se que as estimativas do produto CAMS também apresentaram uma boa concordância com os valores observados da AOD, com valores próximos a 1. No entanto, os menores valores nas métricas estatísticas da AOD foram observados em Petrolina (Tabela 2).

Os parâmetros de erro, como o RMSE e o MAE, apresentaram valores relativamente baixos em todos os sítios analisados, principalmente em São Paulo-EACH, Petrolina e Itajubá.

Contudo, observou-se uma variabilidade nos resultados entre os diferentes sítios. Por exemplo, Ji-Paraná, Rio Branco, São Martinho, Manaus, ATTO e Itajubá apresentaram altos valores de PBIAS, indicando que o produto CAMS tende a superestimar os valores da AOD nesses locais. Por outro lado, em Petrolina o produto CAMS demonstrou uma tendência de subestimar a AOD (Tabela 2).

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos para a Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) medida pela AERONET e estimada pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Os parâmetros incluem: índice de correlação de Pearson "r", índice "d" de Willmott, Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE) e o Percentual de Viés (PBIAS). As correlações com *** indicam nível de significância de $p < 0,001$.

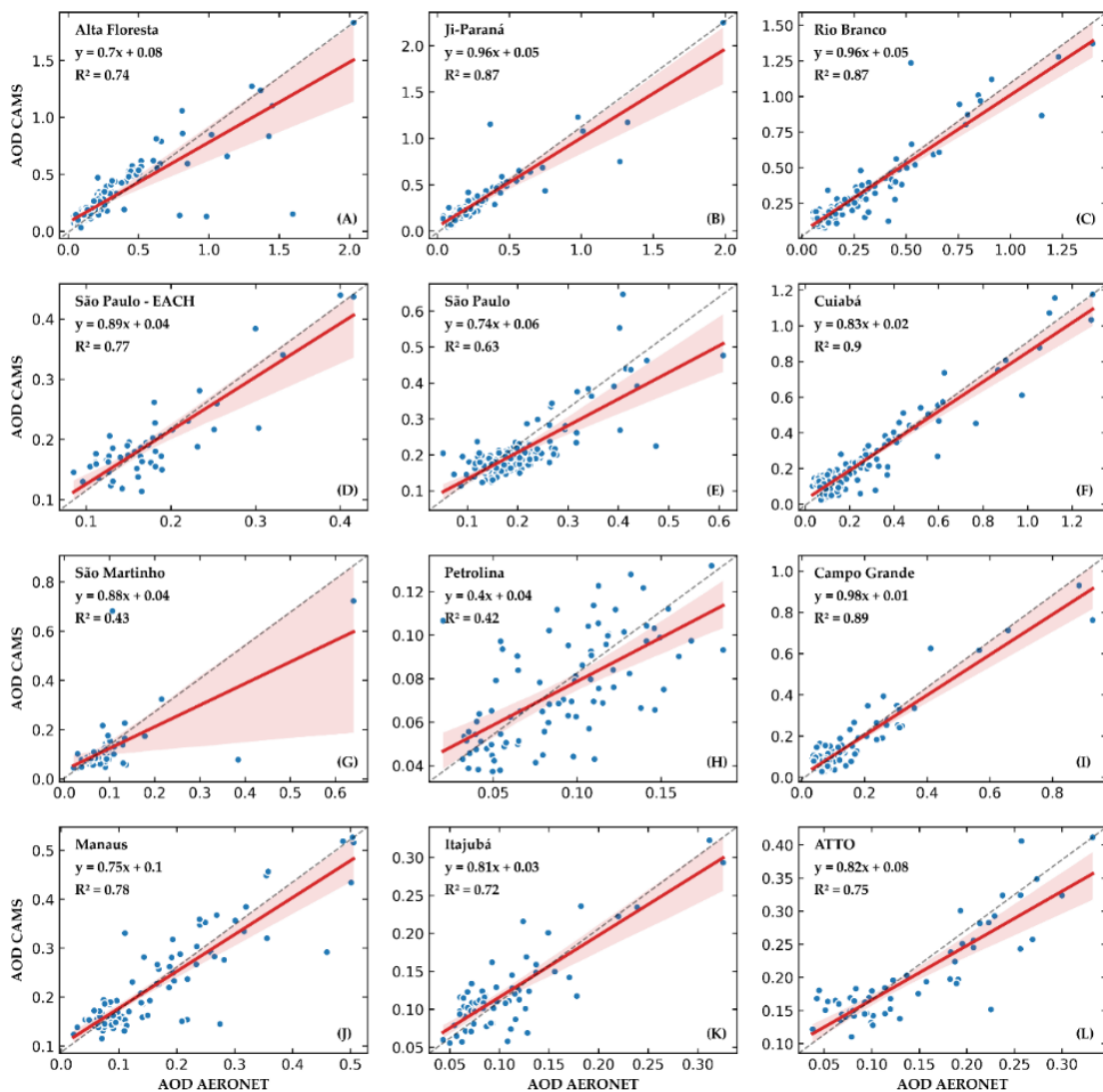
Sítios	r	d	RMSE	MAE	PBIAS
Alta Floresta	0,86***	0,92	0,16	0,07	2,71
Ji-Paraná	0,93***	0,96	0,11	0,06	15,77
Rio Branco	0,94***	0,96	0,09	0,06	15,86
São Paulo-EACH	0,87***	0,92	0,04	0,03	9,30
São Paulo	0,78***	0,88	0,05	0,04	2,93
Cuiabá	0,95***	0,97	0,07	0,05	-5,79
São Martinho	0,65***	0,77	0,09	0,05	20,70
Petrolina	0,65***	0,72	0,03	0,03	-20,13
Campo Grande	0,94***	0,97	0,05	0,03	3,26
Manaus	0,88***	0,86	0,08	0,07	27,71
Itajubá	0,85***	0,90	0,03	0,03	12,19
ATTO	0,86***	0,79	0,07	0,06	29,19

Todos os sítios apresentaram um comportamento de relação linear da AOD medida entre as medidas da AERONET e as estimativas do produto CAMS (Figura 8). Esse comportamento é evidenciado pelos valores significativos do coeficiente angular, coeficiente de interceptação, coeficiente de determinação (R^2), assim como, valor-p extremamente baixos nas regressões lineares realizadas em cada sítio. Essa tendência de comportamento linear sugere que a OAD medida pela AERONET e a estimada pelo CAMS possuem uma relação bem definida, permitindo que seja estabelecida uma reta de regressão que represente a relação entre elas (Figura 8).

Os sítios de Ji-Paraná, Rio Branco, Cuiabá e Campo Grande apresentaram R^2 relativamente altos, em torno de 0,87 a 0,90, o evidencia um bom ajuste dos dados à reta de

regressão (Figura 8). Por outro lado, São Martinho e Petrolina mostraram coeficientes R^2 mais baixos, em torno de 0,42, o que indica um ajuste menos preciso dos dados à reta de regressão. A estação de Campo Grande se destacou com o maior valor de coeficiente de intercepção, atingindo 0,97. Além disso, os sítios de Manaus, Cuiabá e Ji-Paraná obtiveram coeficientes de intercepção consideráveis entre 0,7 e 0,95. Por outro lado, a estação de Petrolina apresentou o menor valor de coeficiente de intercepção, registrando 0,40 (Figura 8).

Figura 8 - Regressão linear entre a Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) medida pela AERONET e estimada pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAM5) no Brasil. Os sítios considerados foram: Alta Floresta (A), Ji-Paraná (B), Rio Branco (C), São Paulo-EACH (D), São Paulo (E), Cuiabá (F), São Martinho (G), Petrolina (H), Campo Grande (I), Manaus (J), Itajubá (K) e ATTO (L).



Especialmente, durante determinadas épocas do ano, como a estação seca, foi registrado um aumento nas concentrações de aerossóis (Figura 9). Isso se deve às queimadas que ocorrem nesse período, liberando partículas finas e poluentes gasosos na atmosfera, resultando em um

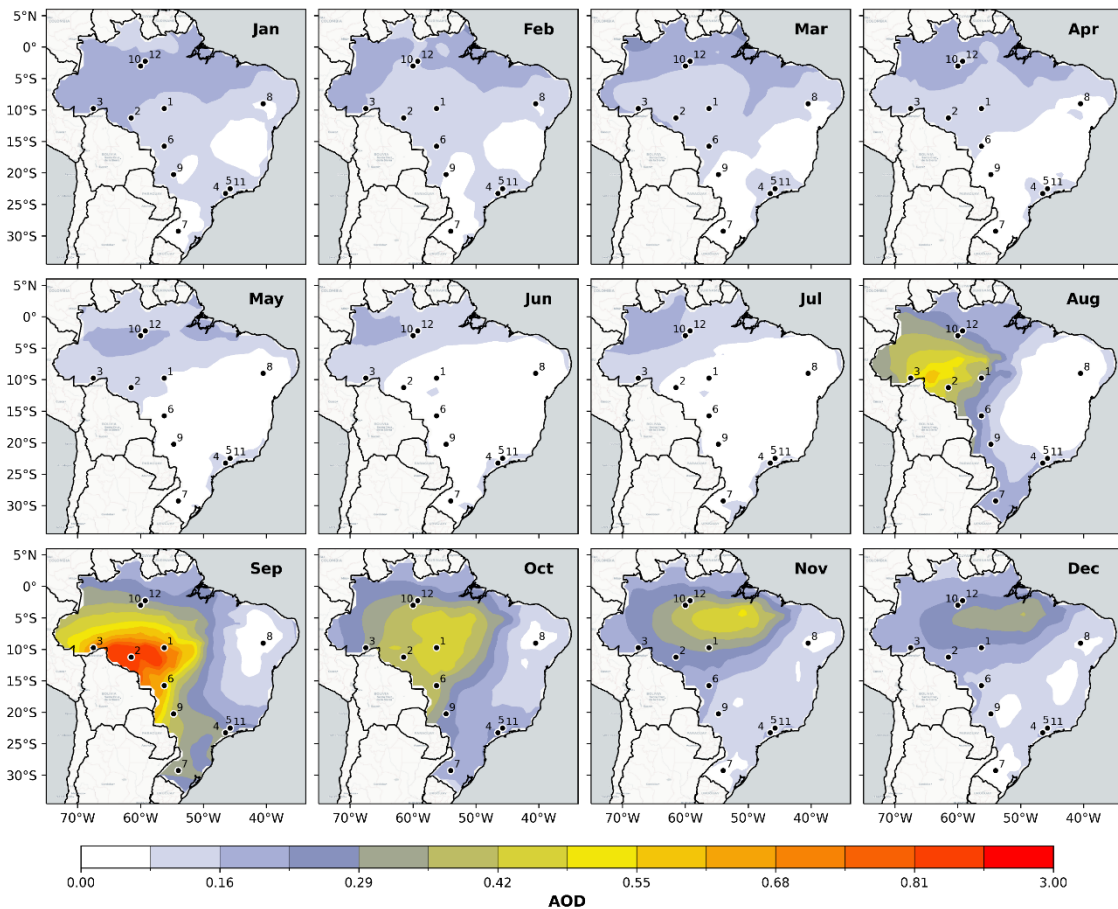
aumento na concentração de AOD. Resultado das queimadas que afetaram quase metade do território brasileiro, principalmente os biomas Amazônia e Cerrado, que foram responsáveis por 86% das emissões de material particulado no Brasil nas últimas duas décadas (PEREIRA, G. *et al.*, 2022).

Por outro lado, durante os meses mais chuvosos, observou-se uma redução nessas concentrações (Figura 9). As chuvas têm o efeito de limpar a atmosfera temporariamente, levando a uma diminuição nas concentrações de aerossóis. A distribuição espacial mensal da AOD no Brasil é influenciada por diversos fatores, como condições climáticas, atividades humanas, queimadas, vegetação e processos naturais. A diversidade climática e de ecossistemas do Brasil também contribui para variações sazonais nas concentrações de aerossóis.

É importante notar que as regiões com as maiores concentrações de aerossóis variam conforme o período analisado. Notadamente, as áreas situadas no arco do desmatamento são as mais afetadas por concentrações elevadas de aerossóis, especialmente durante o mês de setembro (Figura 9). Essa região, localizada na fronteira sul da Amazônia brasileira, é conhecida por sofrer com desmatamento intenso e atividades agrícolas (POPE *et al.*, 2020). O aumento das concentrações de aerossóis nessa região é diretamente ligado ao desmatamento e às queimadas (POPE *et al.*, 2020). Essas partículas podem ter impactos adversos na qualidade do ar, na saúde humana e no meio ambiente.

No Centro-Oeste e Sudeste, a colheita e as queimadas agrícolas na estação seca contribuem para o aumento das concentrações de partículas na atmosfera (PALÁCIOS *et al.*, 2016; TARIQ *et al.*, 2023). O Nordeste enfrenta incêndios durante a estação seca, principalmente em áreas semiáridas (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2021). No Sul, atividades industriais e urbanas geram poluentes que aumentam os aerossóis, especialmente nas cidades densamente povoadas (CALADO *et al.*, 2021). Além disso, nessa região os valores não apresentam grandes variações devido a presença do regime de precipitação ser mais homogênea ao longo do ano (REBOITA *et al.*, 2015).

Figura 9 - Distribuição média mensal da Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) estimados pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil.



3.4. Conclusão

O estudo avaliou as estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) produzidas pelo Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) em diferentes sítios do Brasil, considerando suas variações sazonais. Alta Floresta e Ji-Paraná foram os sítios com os maiores valores de AOD, destacando-se durante a estação seca. Além disso, a presença do fenômeno El Niño em 2007 pode ter contribuído para o aumento dos valores de AOD.

Os valores de AOD foram menores durante uma estação chuvosa em Manaus e Cuiabá. A dinâmica entre as medidas da AERONET e as estimativas do produto CAMS foi geralmente forte, indicando um bom ajuste dos dados na maioria dos sítios analisados. No entanto, alguns sítios apresentaram maiores diferenças entre as medidas da AERONET e as estimativas do CAMS.

Por fim, o CAMS demonstrou um desempenho satisfatório ao estimar a AOD no Brasil, oferecendo informações valiosas sobre as concentrações de aerossóis. Suas análises refinadas permitiram capturar variações sazonais, como o aumento das concentrações de aerossóis durante

a estação seca. Sua capacidade de identificar as áreas mais afetadas, como o arco do desmatamento na Amazônia, ressalta sua eficácia no monitoramento e análise da composição atmosférica do país.

4. ARTIGO 02: TENDÊNCIAS SAZONAIS E A RELAÇÃO ENTRE AEROSSÓIS E A TEMPERATURA DO AR EM DIFERENTES NÍVEIS DA ATMOSFERA NO BRASIL.

RESUMO

A Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) é uma variável fundamental para avaliar a concentração de partículas em suspensão na atmosfera e suas interações com a radiação solar e terrestre. No Brasil, cuja extensão territorial e diversidade de fontes emissoras incluem queimadas, atividades industriais e urbanas, compreender os efeitos dos aerossóis sobre a temperatura do ar é essencial para a análise climática regional. Este estudo investigou a influência dos aerossóis na temperatura do ar (Tar), com base em dados do Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) entre 2003 e 2022. Foram analisadas as estimativas de AOD_TOTAL, AOD_BC (carbono negro) e AOD_SULF (sulfato), com recortes espaciais por bioma e segmentação vertical entre os níveis de 1000 a 850 hPa. Os resultados indicaram forte variabilidade sazonal da AOD_TOTAL, com maiores concentrações na primavera coincidindo com o pico das queimadas e menores no verão, período marcado por intensificação das chuvas e consequente remoção úmida dos aerossóis. As correlações entre AOD e temperatura revelaram padrões contrastantes: aerossóis absorvedores (AOD_BC) apresentaram relação positiva com o aquecimento superficial, enquanto aerossóis dispersivos (AOD_SULF) mostraram correlações negativas, especialmente em áreas urbanas e industrializadas. As análises de tendência revelaram aumento significativo da AOD_TOTAL na primavera e aquecimento contínuo da Tar, com maior intensidade no Centro-Oeste e Sudeste. Estes achados reforçam a importância da composição dos aerossóis, da sazonalidade e das pressões antrópicas na modulação térmica regional, fornecendo subsídios relevantes para políticas públicas de mitigação climática e gestão ambiental no Brasil.

Palavras-chave: profundidade óptica dos aerossóis; reanálises; variabilidade climática; variáveis meteorológicas.

4.1. Introdução

A Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD) é uma variável amplamente utilizada para avaliar a concentração e a distribuição espacial dos aerossóis atmosféricos (LIU et al., 2020; PEDREIRA JÚNIOR et al., 2025). Essas partículas, sólidas ou líquidas (aerossóis), exercem influência significativa sobre o balanço energético terrestre, modificando tanto a radiação solar incidente quanto a radiação terrestre refletida por meio dos processos de espalhamento e absorção (GARRIGUES et al., 2022; Yamagami et al., 2022) . Conseqüentemente, esses processos têm impactos em processos ambientais e socioeconômicos, bem como, sobre as condições meteorológicas e climáticas regionais e globais (GARRIGUES et al., 2022a).

Apesar da crescente compreensão das influências dos aerossóis nas mudanças climáticas, a complexidade das interações atmosféricas, especialmente em entender como a AOD influencia a temperatura do ar em diferentes regiões, ainda causa incertezas científicas significativas (STEIDLE NETO e LOPES, 2018; PALÁCIOS et al., 2024). Estas incertezas aumentam ainda mais ao analisar-se grande áreas territoriais, que possuem diferentes fontes emissoras, bem como climas diferentes, como é o caso do Brasil. Além disso, os aerossóis afetam diretamente o clima ao atuar como forçantes radiativas, interferindo nos fluxos de energia da superfície e na taxa de aquecimento da atmosfera (KRAMER et al., 2024). O efeito direto ocorre por meio do espalhamento e absorção da radiação, o que pode causar resfriamento da superfície ou aquecimento das camadas atmosféricas, dependendo da composição das partículas presentes (KRAMER et al., 2024).

Já o efeito indireto está relacionado à sua interação com as nuvens, influenciando propriedades microfísicas e a refletividade, com impactos relevantes no balanço radiativo e nos processos de precipitação. Essas alterações podem modificar a estabilidade atmosférica e os padrões locais de temperatura (KRAMER et al., 2024). Portanto, ainda que exista evidências da relação entre a presença de aerossóis e a temperatura do ar, especialmente em escala regional ou global, são escassas as análises que explorem essas interações de forma integrada em diferentes níveis da atmosfera e com recorte espacial voltado ao território brasileiro.

No Brasil, esse tipo de investigação torna-se ainda mais relevante devido à diversidade climática, grande extensão territorial e às diversas fontes emissoras de aerossóis (DA SILVA et al., 2025; LIU et al., 2020; MONTEIRO DOS SANTOS et al., 2021; THORNHILL et al., 2018). Visto que o país possui peculiaridades únicas relacionadas às fontes de emissão de aerossóis,

como queimadas intensas, práticas agrícolas frequentes, atividades industriais e grandes aglomerados urbanos (Ramos et al., 2024).

Neste contexto, a análise da influência da AOD sobre a temperatura de diferentes níveis da troposfera contribui significativamente para o aprimoramento das previsões climáticas e meteorológicas, especialmente em regiões mais suscetíveis à poluição atmosférica e às mudanças climáticas, como é o caso do Brasil (AZIMI e RAHMAN, 2024). Para investigar detalhadamente essa relação entre AOD e a temperatura em diferentes camadas da troposfera, ferramentas avançadas de reanálise, como o CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), surge como uma alternativa plausível.

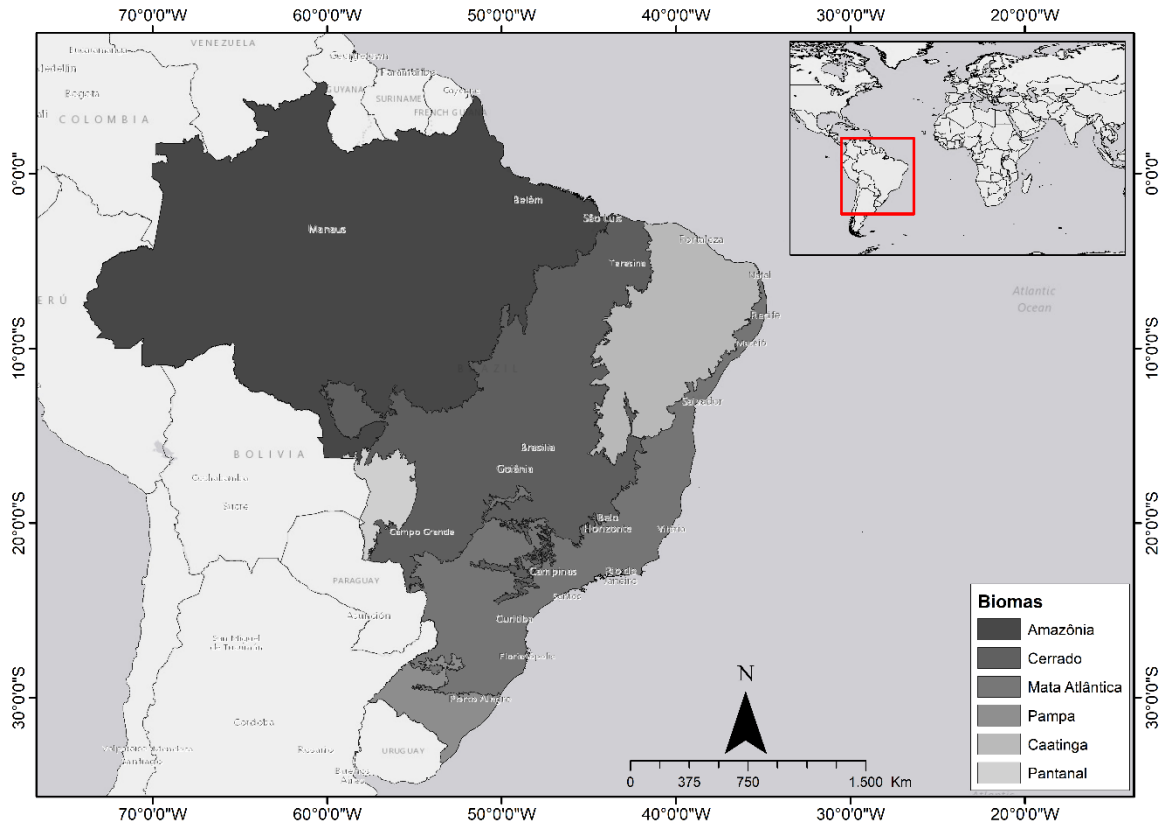
Esse produto de reanálise disponibiliza dados detalhados sobre a distribuição espacial e temporal de aerossóis e variáveis meteorológicas, proporcionando análises robustas e detalhadas das interações atmosféricas (WAGNER et al., 2021). Essa integração fornece informações importantes para entender como diferentes regiões brasileiras são afetadas pela presença dos aerossóis. Assim, o objetivo deste estudo é analisar as influências de aerossóis atmosféricos na temperatura do ar e suas tendências sazonais no Brasil.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado para o Brasil, país que ocupa a maior parte da América do Sul e se destaca por sua vasta extensão territorial, diversidade topográfica e ampla variedade de ecossistemas. Esses fatores conferem ao território brasileiro uma elevada complexidade climática, marcada por diferentes regimes de temperatura, precipitação e sazonalidade. O Brasil abriga seis biomas principais: Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pantanal e Pampa, cada um com características ecológicas, climáticas e de uso do solo distintas (HOLANDA et al., 2023). Essa heterogeneidade torna o país um cenário estratégico para a investigação das interações entre aerossóis atmosféricos e variáveis climáticas, especialmente em escalas regionais.

Figura 10 - Localização da área de estudo, destacando a distribuição espacial dos biomas Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal.



4.2.2. Dados

Foram utilizados dados mensais de Profundidade Óptica de Aerossóis (AOD_TOTAL), Profundidade Óptica de Aerossóis de Carbono Negro (AOD_BC), Profundidade Óptica de Aerossóis de Sulfato (AOD_SULF) e Temperatura do ar (Tar) no período de 2003 a 2022, obtidos do Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). A validação do CAMS é realizada periodicamente e coordenada pela Royal Dutch Meteorological Organization (ESKES et al., 2015; LANGEROCK et al., 2022). Além disso, as estimativas de AOD do produto CAMS, para área de estudo, e utilizadas nesta pesquisa foram validadas por Pedreira Júnior et al. (2025).

O CAMS possui uma resolução espacial de aproximadamente 80 km e fornece campos tridimensionais de parâmetros de composição atmosférica (<https://atmosphere.copernicus.eu/>). O CAMS integra modelos numéricos avançados com dados de sensoriamento remoto via satélite e observações *in loco*, o que permite a estimativa global de aerossóis e parâmetros meteorológicos (GARRIGUES et al., 2022).

As estimativas de AOD_BC refere-se especificamente à fração absorvedora da AOD atribuída ao carbono negro, uma partícula resultante principalmente da queima incompleta de biomassa e combustíveis fósseis, sendo reconhecida como um dos aerossóis com maior potencial de aquecimento atmosférico. Por outro lado, a variável AOD_SULF representa aerossóis dispersivos formados principalmente pela oxidação de SO₂, emitido por indústrias e queima de combustíveis fósseis, os quais refletem a radiação solar e contribuem para o resfriamento da superfície. A base de dados do CAMS fornece séries históricas consistentes e confiáveis, sendo amplamente utilizada na análise de tendências climáticas e da variabilidade atmosférica bem como em pesquisa ambiental (GARRIGUES et al., 2022).

4.2.3. Análise das Estimativas

As estimativas de AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF (todas a 550 nm), além da Temperatura do Ar (Tar; °C), foram analisadas climatologicamente em intervalos anuais e sazonais de acordo com as seguintes definições para o Hemisfério Sul: verão austral – dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); outono austral – março, abril e maio (MAM); inverno austral – junho, julho e agosto (JJA); primavera austral – setembro, outubro e novembro (SON) (LUIZ-SILVA et al., 2021).

Para caracterizar a variabilidade das estimativas, foram aplicadas estatísticas descritivas, incluindo valores mínimos, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil, máximos (Boxplot). Além disso, para analisar a relação entre as variáveis AOD_TOTAL, AOD_BC, AOD_SULF e Tar, utilizou-se a análise de correlação de Pearson, com um intervalo de confiança de 95%, utilizando o método de 'bootstrapping' com 1000 reamostragens (EFRON and TIBSHIRANI, 1994; PEARSON et al., 1994). A análise de tendências foi realizada pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall (KENDALL, 1948; MANN, 1945) (Equações 1 a 4).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$(x_j - x_k) = 1 \text{ se } x_j - x_k > 0 \quad (2)$$

$$(x_j - x_k) = 0 \text{ se } x_j - x_k = 0 \quad (3)$$

$$(x_j - x_k) = -1 \text{ se } x_j - x_k < 0 \quad (4)$$

Onde, X_j e X_k são valores de dados nos tempos j e k ; n é o tamanho da amostra.

A presença de significância entre as tendências foi testada pelo teste estatístico normalizado (Z) (Equação 5).

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Onde, Var refere-se a variância da população.

A magnitude das tendências foi calculada a partir do método de Theil-Sem (SEN, 1968) (Equação 6).

$$TS = M_d \left(\frac{x^k - x^j}{k - j} \right), \quad j < k \quad (6)$$

Onde, M_d é a mediana, X_j e X_k são valores de dados nos tempos j e k , respectivamente.

4.2.4. Segmentação Vertical e Espacial

Considerando que os efeitos dos aerossóis variam ao longo da coluna atmosférica, as análises foram realizadas em diferentes níveis de pressão, classificadas entre 1000 hPa a 850 hPa (camadas próximas à superfície). Essa abordagem permite avaliar os impactos verticais diferenciados, como o resfriamento da superfície ou o aquecimento atmosférico superior, a depender do tipo e da distribuição dos aerossóis. Além disso, os dados foram espacialmente organizados por regiões brasileiras, com ênfase nos seis principais biomas: Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pantanal e Pampa. Essa abordagem permitiu analisar a influência dos aerossóis considerando as especificidades climáticas, ecológicas e de uso do solo de cada região.

A Amazônia é marcada por elevada umidade e densas florestas tropicais, mas sofre intensamente com queimadas sazonais, sobretudo no período seco (inverno austral), que elevam os níveis de aerossóis, em especial o carbono negro (HOLANDA et al., 2023). O Cerrado, caracterizado por vegetação savânica e estação seca bem definida, é frequentemente impactado

por queimadas naturais e antrópicas, além de atividades agropecuárias que contribuem para a emissão de aerossóis primários e secundários (MATAVELI et al., 2019). A Mata Atlântica, com clima úmido e elevada cobertura vegetal remanescente em áreas serranas e costeiras, possui menores índices de AOD, mas é afetada por emissões urbanas e industriais em grandes regiões metropolitanas (ADORNO et al., 2025).

A Caatinga, bioma semiárido do Nordeste brasileiro, apresenta baixos índices pluviométricos e elevada insolação, condições que favorecem o levantamento de poeira e partículas do solo, além de ser impactada por queimadas em anos de seca severa (GOUVEIA et al., 2024). O Pantanal, embora seja um dos biomas mais úmidos do país, tem apresentado crescimento nas ocorrências de incêndios florestais e queimadas associadas à expansão da agropecuária, com impactos crescentes na carga de aerossóis (RAMOS et al., 2024). Por fim, o Pampa, localizado no sul do país, possui clima subtropical e paisagem campestre, sendo influenciado por atividades agrícolas e queimadas esporádicas, com menor contribuição de fontes emissoras em comparação aos demais biomas.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Variabilidade Sazonal da AOD e Tar

A Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL) apresentou variações sazonais expressivas no Brasil, com menores valores no verão (DJF) e maiores concentrações na primavera (SON), especialmente sobre os biomas Cerrado, Pantanal e Amazônia (Figura 11 – A1). Essa sazonalidade reflete diretamente a ocorrência das queimadas, intensificadas entre julho e outubro, durante a estação seca. De acordo com Rocha-Lima et al. (2018), o pico da AOD está diretamente associado ao aumento das emissões de partículas originadas da queima de biomassa, fenômeno amplamente documentado nas regiões Norte e Centro-Oeste do país. O trabalho de Palácios et al. (2020) também ressalta o papel das queimadas como principal fonte de aerossóis absorvedores nessas regiões.

Por outro lado, os valores mínimos de AOD_TOTAL registrados no verão coincidem com o período de maior precipitação, sobretudo nas regiões tropicais, o que contribui para a remoção úmida dos aerossóis atmosféricos. Esse mecanismo é particularmente eficaz em áreas de floresta tropical, como a Amazônia, reduzindo temporariamente a concentração de partículas suspensas (ZHOU et al., 2023). A análise temporal de AOD_TOTAL (Figura 11 – B1) revela a regularidade

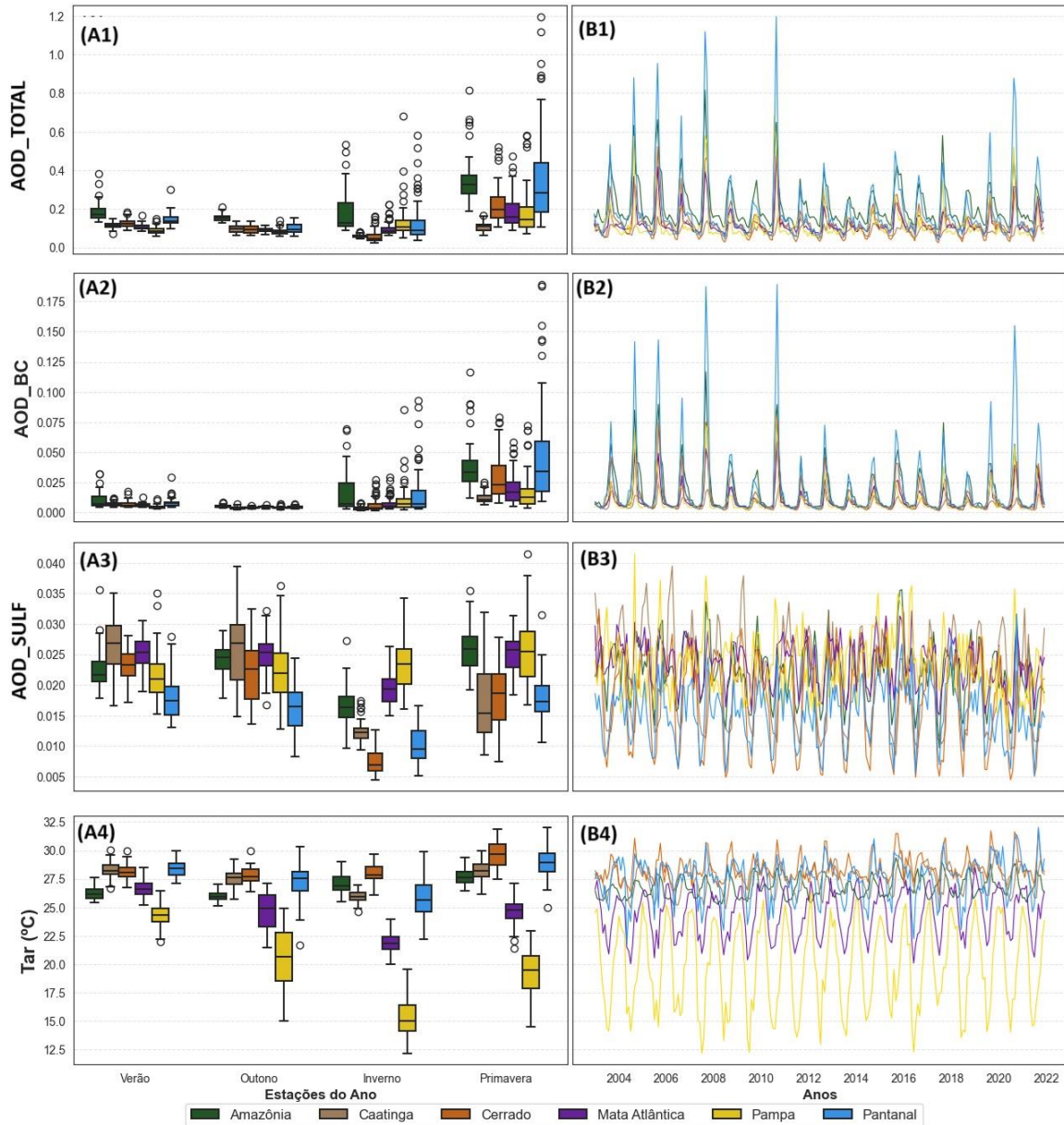
dos ciclos sazonais e indica uma intensificação da concentração de aerossóis em anos específicos, possivelmente associados a eventos climáticos extremos como o El Niño. Este fenômeno tende a reduzir a umidade relativa e prolongar a estação seca, favorecendo incêndios florestais e elevando a emissão de partículas (GAVIDIA-CALDERÓN et al., 2024).

De maneira semelhante, os valores de AOD_BC (carbono negro) (Figura 11 – A2) também apresentaram forte variação sazonal, com picos no inverno e na primavera, particularmente sobre o Pantanal, Cerrado e Amazônia. Esses valores refletem o aumento das emissões de carbono negro oriundas da queima incompleta de biomassa durante o período seco. Durante o verão, os valores de AOD_BC diminuem abruptamente, em função do aumento das chuvas e consequente redução das queimadas. A série temporal correspondente (Figura 11 – B2) mostra padrões cíclicos bem definidos, com maior amplitude em anos com anomalias climáticas, como El Niño. Embora menos abundante que o AOD_TOTAL, o AOD_BC exerce forte influência no aquecimento radiativo da atmosfera devido à sua alta capacidade de absorção (GARRIGUES et al., 2022).

No caso do AOD_SULF (Figura 11 – A3), observou-se um comportamento menos sazonal e mais distribuído entre os biomas. Embora os valores sejam relativamente constantes ao longo do ano, destaca-se a concentração mais elevada sobre áreas urbanizadas e industrializadas, como a Mata Atlântica e o Sudeste do Cerrado. A série temporal (Figura 11 – B3) apresenta maior variabilidade, compatível com a origem difusa e contínua dos aerossóis sulfatados, cuja formação está associada à transformação atmosférica de precursores gasosos (como SO₂) emitidos por veículos, indústrias e termelétricas. Apesar da menor capacidade de absorção, o AOD_SULF contribui para o resfriamento radiativo regional, ao atuar como aerossol dispersivo.

Quanto à temperatura do ar (Tar) (Figura 11 – A4), os maiores valores foram observados sobre os biomas Cerrado e Pantanal, especialmente no verão e primavera, refletindo o predomínio do clima tropical continental. Em contraste, o Pampa apresentou as menores temperaturas médias anuais, coerente com sua posição geográfica em uma faixa de clima subtropical úmido. A análise da série temporal (Figura 11 – B4) revela aumento gradual da temperatura em todos os biomas ao longo do período de estudo (2003–2022), com destaque para o Centro-Oeste e Sudeste. Esses achados confirmam projeções de aquecimento regional já apontadas por Nobre et al. (2016), sendo potencializadas pela combinação de mudanças no uso do solo, urbanização crescente e redução da cobertura vegetal.

Figura 11 - Boxplots (A) e séries temporais (B) das estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e Temperatura do ar (Tar), estimadas pelo Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) no Brasil.



4.3.2. Influências da AOD na Tar em Diferentes Níveis de Pressão Atmosférica

A correlação entre a profundidade óptica dos aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a Tar apresentou forte dependência da composição do aerossol e do nível atmosférico analisado. Na Figura 12, estão representadas as correlações nos níveis mais baixos da troposfera, entre 1000 hPa e 850 hPa, que compreendem aproximadamente a camada limite atmosférica e parte da baixa troposfera, onde predominam os efeitos diretos dos aerossóis sobre a radiação e o clima regional.

As correlações entre AOD_TOTAL e temperatura do ar mostraram-se positivas e estatisticamente significativas em grande parte da Amazônia, Centro-Oeste e Sudeste, ao longo de todos os níveis representados. Esse padrão indica que a presença de aerossóis está associada ao aumento da temperatura do ar próximo à superfície nessas regiões. Isso pode ser atribuído à grande quantidade de partículas emitidas por queimadas e fontes urbanas, especialmente aerossóis absorvedores como o carbono negro, que contribuem para o aquecimento atmosférico local por meio do aumento do forçamento radiativo direto (AMORIM et al., 2020). A tendência de intensificação das correlações com o aumento da pressão (isto é, aproximação da superfície) sugere maior acúmulo e influência radiativa direta desses aerossóis nas camadas mais próximas do solo.

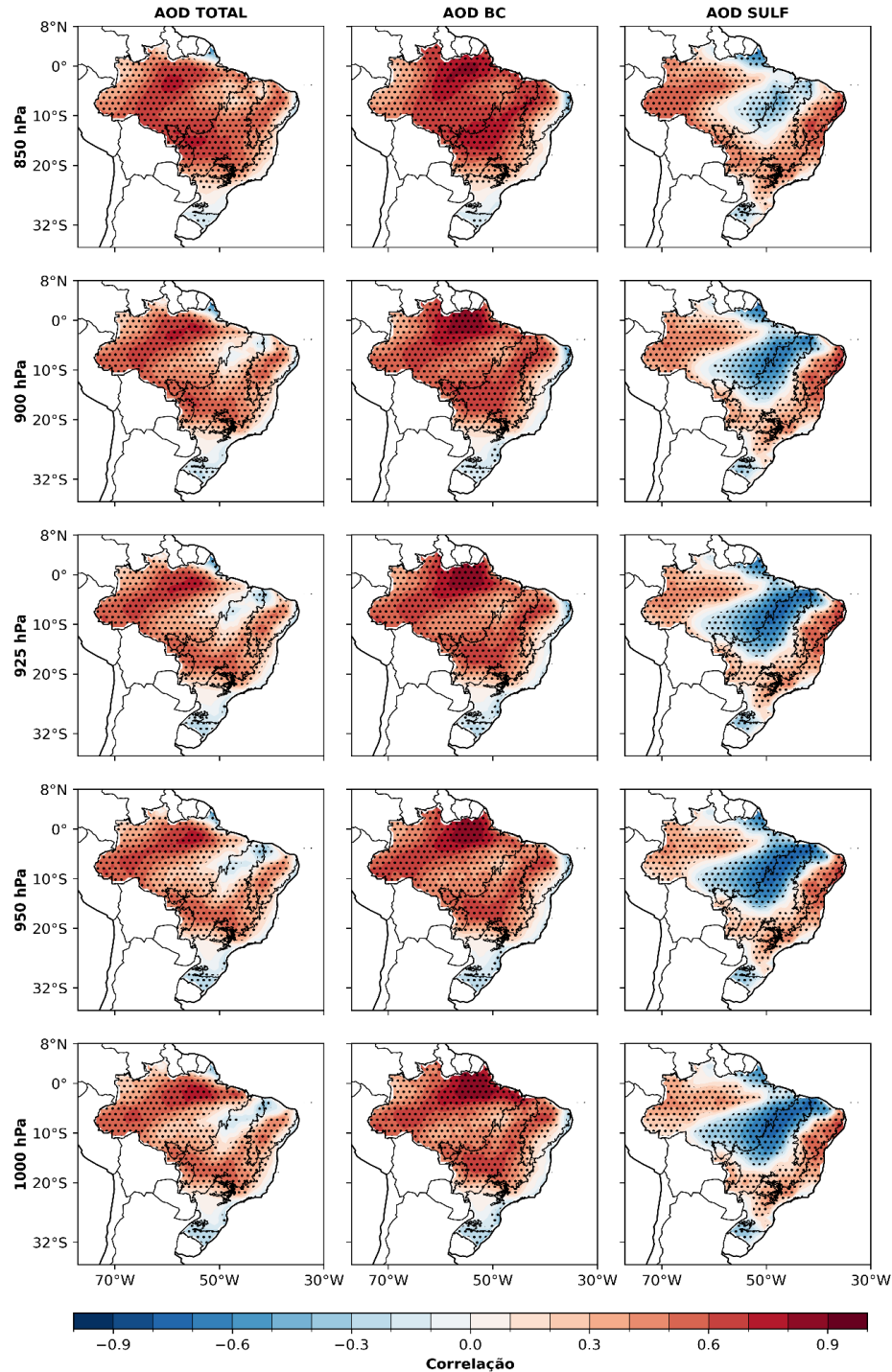
No caso do AOD_BC, observa-se um padrão semelhante ao do AOD_TOTAL, porém com correlações ainda mais elevadas e espacialmente concentradas nas regiões com maior atividade de queima de biomassa. Isso reforça a capacidade altamente absorvedora do carbono negro, que, ao absorver radiação solar, aquece diretamente a camada atmosférica onde se encontra, e pode também influenciar a estabilidade atmosférica e reduzir a formação de nuvens, favorecendo o aquecimento adicional da superfície (AMORIM et al., 2020).

Em contraste, os mapas de correlação do AOD_SULF e Tar revelam um comportamento inverso. As correlações tenderam a ser negativas nas regiões Sul, Sudeste e parte do Centro-Oeste, principalmente nos níveis de 950 a 1000 hPa, com significância estatística evidente. Os aerossóis de sulfato, geralmente oriundos de processos industriais, transporte veicular e transformação química de precursores gasosos (como o SO₂), possuem alta capacidade de espalhamento da radiação solar, promovendo o resfriamento da superfície ao aumentar o albedo atmosférico e reduzir o fluxo de energia incidente (ZHAO et al., 2011).

Além disso, a distribuição geográfica dos padrões de correlação sugere que a influência dos aerossóis é altamente regionalizada, dependente da origem e composição das partículas, da circulação atmosférica local e da densidade urbana ou de queimadas (KIPLING et al., 2016). A coexistência de áreas com correlação positiva (associadas ao aquecimento) e negativa (associadas ao resfriamento) reforça a complexidade das interações entre aerossóis e clima regional.

Figura 12 - Correlação entre as estimativas anuais de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a Temperatura do ar (Tar) em diferentes níveis de pressão atmosférica no

Brasil. A cor azul representa correlação negativa e vermelho representa correlação positiva. As regiões pontilhadas representam valores estatisticamente significativos ($p < 0,05$).



4.3.3. Influências Sazonais da AOD na Tar

A análise sazonal da correlação entre a profundidade óptica dos aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a temperatura do ar (Tar) revelou padrões regionais distintos entre os biomas brasileiros (Figura 13). Na Amazônia, observaram-se correlações positivas estatisticamente significativas durante o verão e o inverno, mais concentradas na porção central.

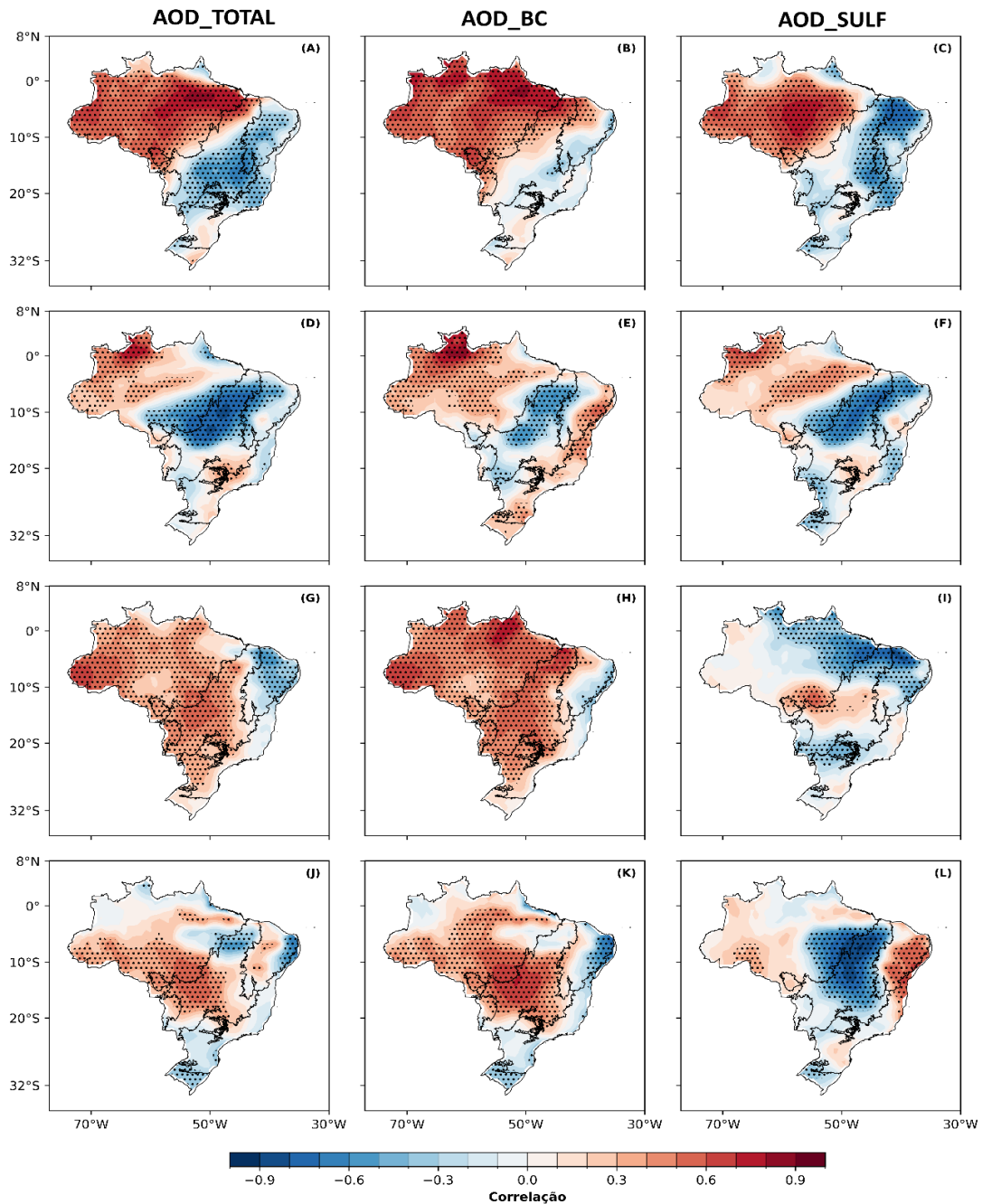
Esse comportamento é atribuído à emissão intensa de aerossóis de queimadas, que se acumulam na atmosfera e contribuem para o aquecimento local por meio da absorção de radiação solar. Tal efeito é ainda mais evidente no caso do AOD_{BC}, cujas propriedades fortemente absorvedoras reforçam o papel dos aerossóis na modulação térmica regional (ARAGÃO e SHIMABUKURO, 2010).

No Cerrado, os padrões foram mais heterogêneos. De modo que, durante o verão e o inverno, predominaram correlações positivas na região norte e central, coincidentes com os períodos e áreas de maior atividade de queimadas. Em contraste, o sul e o sudeste do bioma exibiram correlações negativas, especialmente no outono e primavera. Essa variabilidade espacial e temporal reflete a complexidade das fontes de emissão, que incluem áreas agrícolas, urbanas e vegetação nativa, além da influência dos regimes de circulação atmosférica, que determinam o transporte e a deposição dos aerossóis (VALIATI et al., 2018).

Na Mata Atlântica, as correlações tenderam a ser negativas em todas as estações, com maior intensidade no outono e inverno. Esse padrão está associado à predominância de aerossóis com propriedades dispersivas, como os sulfatos (AOD_{SULF}) e nitratos, frequentemente originados de fontes urbanas e industriais. O AOD_{SULF} apresentou correlações negativas mais consistentes, especialmente nas porções costeiras, sugerindo que sua influência radiativa contribui para o resfriamento da superfície, ao aumentar o albedo e reduzir a radiação incidente. No caso do AOD_{BC}, os valores foram menores, e a relação com a temperatura permaneceu fraca ou negativa, indicando baixa influência radiativa direta desse componente na região (YU et al., 2020).

A Caatinga e o Pantanal apresentaram comportamento semelhante, com correlações positivas marcantes durante a estação seca, indicando o efeito direto das queimadas na elevação das temperaturas locais. Em ambas as regiões, o AOD_{BC} teve papel expressivo, reforçando o impacto do carbono negro no balanço energético regional. Por outro lado, o AOD_{SULF} teve influência reduzida, exceto em episódios localizados de transporte de poluentes industriais, devido à baixa densidade urbana nessas áreas. A presença prolongada de aerossóis absorvedores, associada à escassez de precipitação, intensifica a absorção de radiação e o subsequente aquecimento da camada limite atmosférica. Já no Pampa, observaram-se correlações negativas ao longo do ano, tanto para AOD_{TOTAL} quanto para AOD_{BC} e AOD_{SULF}. Isso reflete a menor influência de fontes de emissão antrópica e a dominância de aerossóis naturais, como poeira mineral e compostos vegetais, que tendem a refletir a radiação solar e promover o resfriamento superficial (THORNHILL et al., 2021).

Figura 13 - Correlação entre as estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a Temperatura do ar (Tar) nas estações de Verão (A, B e C), Outono (D, E e F), Inverno (G, H e I) e primavera (J, K e L). A cor azul representa correlação negativa e vermelho representa correlação positiva. As regiões pontilhadas representam valores estatisticamente significativos ($p < 0,05$).



A análise quantitativa entre a Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL) e a temperatura do ar (Tar) por bioma (Figura 14) revelou correlações positivas moderadas na Amazônia ($r = 0,62$; $R^2 = 0,39$), Cerrado ($r = 0,61$; $R^2 = 0,37$) e Caatinga ($r = 0,57$; $R^2 = 0,33$), o que reforça a influência das queimadas na elevação da temperatura regional. Tais padrões indicam que, nesses biomas, o acúmulo de partículas atmosféricas, sobretudo durante a estação seca, que

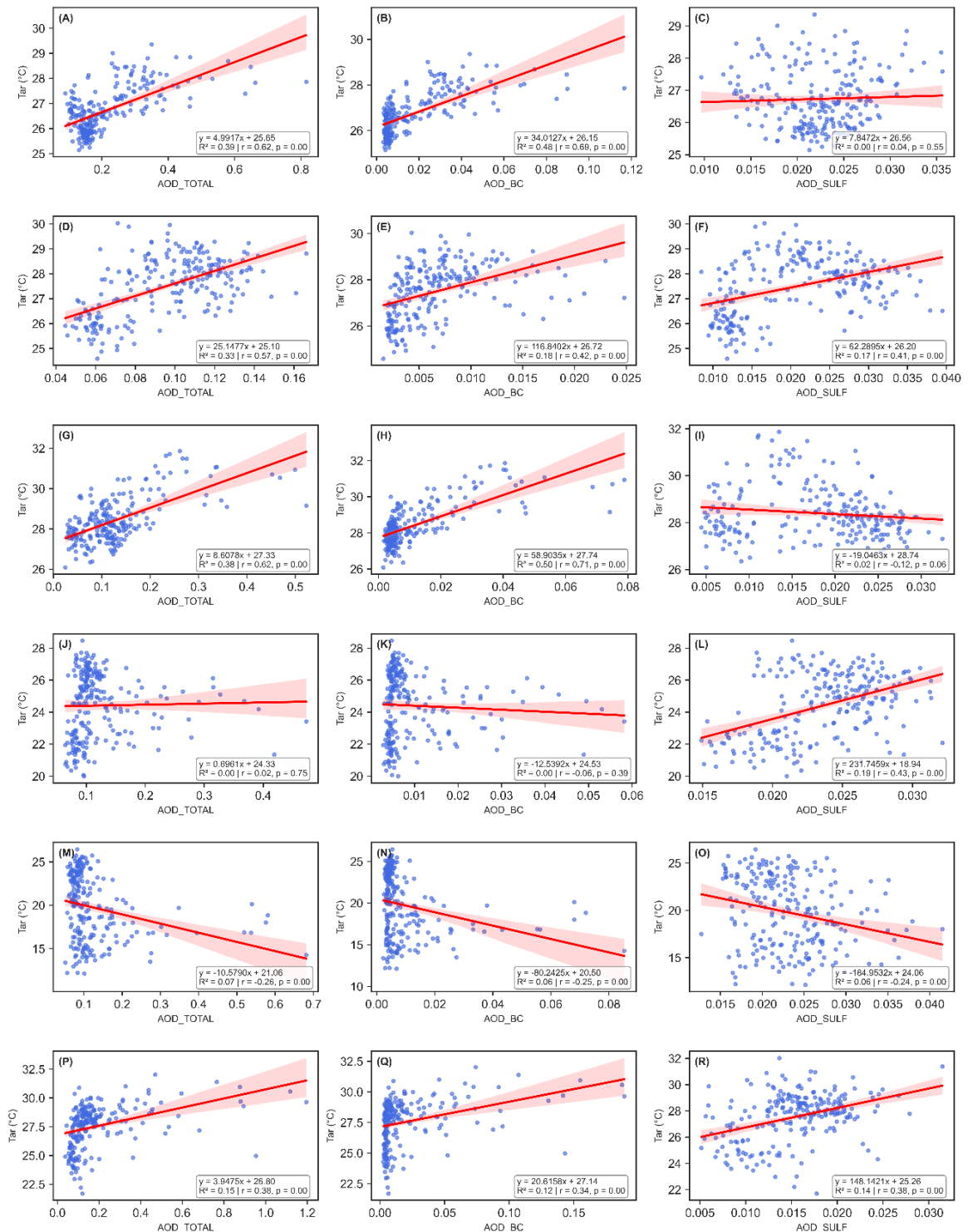
favorece o aquecimento da superfície por absorção direta da radiação solar (Gavidia-Calderón et al., 2024). No Pantanal, a correlação também foi positiva ($r = 0,42$; $R^2 = 0,18$), embora de menor magnitude, sugerindo influência sazonal menos consistente.

Por outro lado, a Mata Atlântica apresentou correlação praticamente nula entre AOD_TOTAL e temperatura ($r = 0,02$; $R^2 = 0,00$), refletindo a maior complexidade de fatores reguladores locais, como altitude, cobertura vegetal densa e influência marítima (Miyaji et al., 2021). No Pampa, a correlação foi negativa ($r = -0,25$; $R^2 = 0,06$), comportamento típico de regiões subtropicais onde os aerossóis presentes são majoritariamente naturais e de caráter dispersivo, como poeira e compostos orgânicos.

Considerando o AOD_BC (painéis B, E, H, K, N, Q), as correlações foram ainda mais expressivas nos biomas com maior carga de queimadas: Amazônia ($r = 0,69$; $R^2 = 0,48$), Cerrado ($r = 0,68$; $R^2 = 0,46$) e Caatinga ($r = 0,67$; $R^2 = 0,45$), evidenciando o papel central do carbono negro no aquecimento atmosférico regional. Esse tipo de aerossol absorvedor contribui para a elevação da temperatura ao interferir diretamente no balanço radiativo. No Pantanal, a relação foi positiva, porém mais discreta ($r = 0,30$; $R^2 = 0,09$). Já na Mata Atlântica ($r = -0,20$; $R^2 = 0,04$) e no Pampa ($r = -0,50$; $R^2 = 0,25$), a correlação foi negativa, compatível com a menor presença de fontes de emissão de BC e a dominância de partículas de caráter dispersivo.

Em relação ao AOD_SULF (painéis C, F, I, L, O, R), os resultados indicam comportamento distinto dos aerossóis absorvedores. As correlações foram fracas ou inexistentes na Amazônia ($r = 0,04$; $R^2 = 0,00$) e Caatinga ($r = 0,22$; $R^2 = 0,05$), enquanto no Cerrado a relação foi ligeiramente positiva ($r = 0,37$; $R^2 = 0,14$), possivelmente associada à presença de fontes mistas de emissão, incluindo atividades agrícolas e industriais. Em contraste, a Mata Atlântica ($r = -0,26$; $R^2 = 0,07$) e o Pampa ($r = -0,53$; $R^2 = 0,28$) apresentaram correlações negativas mais pronunciadas, coerentes com o efeito dispersivo dos sulfatos, que refletem a radiação solar e promovem resfriamento atmosférico. No Pantanal, a correlação com temperatura foi moderada ($r = 0,27$; $R^2 = 0,06$), sugerindo papel secundário do AOD_SULF nesse bioma.

Figura 14 - Gráfico de dispersão entre as estimativas anuais de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a Temperatura do ar (Tar) na Amazônia (A, B e C), Caatinga (D, E e F), Cerrado (G, H e I), Mata Atlântica (J, K e L), Pampa (M, N e O) e Pantanal (P, Q e R).



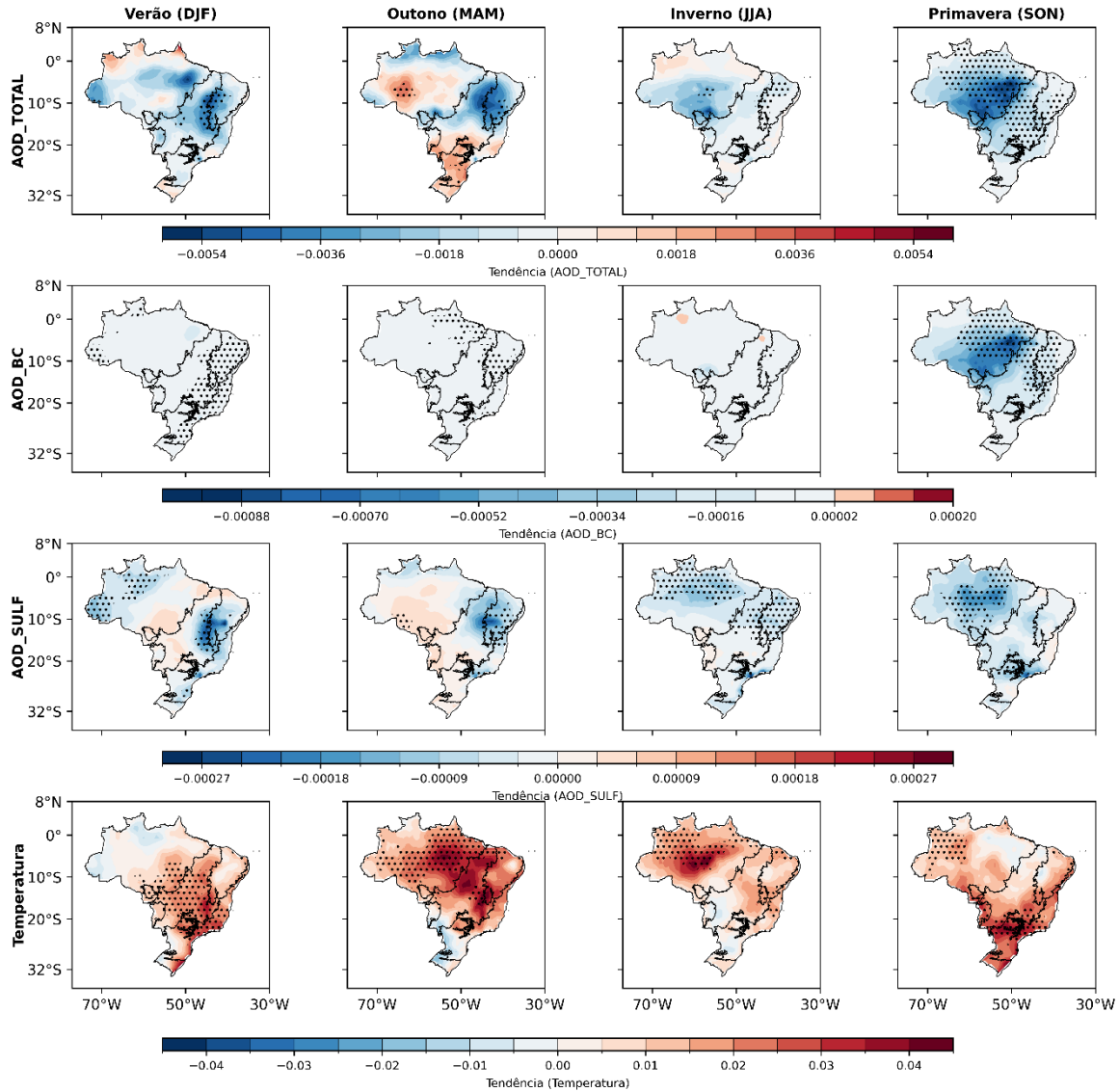
4.3.4. Tendências Sazonais nas estimativas de AOD e Tar

A análise de tendências sazonais (Figura 15) revelou padrões distintos entre os diferentes tipos de aerossóis e as estações do ano, destacando interações complexas entre fontes de emissão, circulação atmosférica e mudanças no uso do solo. Para o AOD_TOTAL, os maiores sinais de aumento ocorreram na primavera (SON), estação marcada por intensa atividade de queimadas na Amazônia e no Cerrado. Observou-se uma tendência positiva estatisticamente significativa nessas regiões, compatível com a intensificação do desmatamento e da degradação florestal (GLOBAL FIRE EMISSIONS DATABASE, 2025; ARAGÃO et al., 2018). No outono (MAM), os sinais de tendência foram mais fracos e pontuais, enquanto no verão (DJF) e inverno (JJA) predominaram tendências negativas ou neutras.

A análise do AOD_BC (carbono negro) indicou tendências negativas ou ausência de sinal significativo na maior parte do Brasil, ao longo de todas as estações. No entanto, durante a primavera, observou-se uma tendência de redução em partes da Amazônia e do Nordeste, o que pode indicar variações interanuais nas queimadas ou aumento da eficiência de dispersão atmosférica. Esse resultado também pode refletir o crescimento relativo de outros tipos de aerossóis menos absorvedores na composição total. Quanto ao AOD_SULF, os padrões foram mais variáveis, com tendências negativas nas regiões Sudeste e Sul do Brasil, especialmente no inverno e primavera. Isso pode estar relacionado à maior deposição úmida durante estas estações. Em contrapartida, algumas áreas do Centro-Oeste e Nordeste apresentaram tendências positivas localizadas, possivelmente relacionadas à urbanização crescente e ao uso de combustíveis fósseis em zonas em expansão.

A temperatura do ar apresentou tendência positiva em todas as estações, com maior intensidade no outono e primavera, especialmente nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e parte do Sul do Brasil. O padrão generalizado de aquecimento é compatível com as projeções de mudanças climáticas regionais, que indicam maior aquecimento em regiões de transição vegetacional e sob pressão antrópica (MARENGO et al., 2018). Áreas como a Mata Atlântica e o Cerrado, que enfrentam crescente urbanização e redução de cobertura vegetal, mostraram aquecimento relativo mais acentuado. Esse processo pode intensificar os efeitos térmicos regionais, afetando o balanço energético local e a resiliência climática desses biomas.

Figura 15 - Tendências sazonais nas estimativas de Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) e a Temperatura do ar (Tar) durante as estações de Verão, Outono, Inverno e primavera. A cor azul representa correlação negativa e vermelho representa correlação positiva. As regiões pontilhadas representam valores estatisticamente significativos ($p < 0,05$).



4.4. Conclusão

A Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL) apresentou forte variabilidade sazonal e espacial no Brasil, diretamente influenciada por fatores como queimadas, regimes de precipitação e padrões climáticos regionais. Os maiores valores foram registrados na primavera, especialmente sobre os biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, em consonância com o pico da estação seca e o aumento da emissão de partículas por queima de biomassa. Por outro lado, os menores valores ocorreram no verão, quando a intensificação das chuvas favorece a remoção úmida dos aerossóis atmosféricos.

A correlação entre as concentrações de AOD_TOTAL e a temperatura do ar (Tar) revelou padrões distintos entre os biomas, as estações e os níveis de pressão atmosférica. Em regiões tropicais e nos níveis inferiores da troposfera (1000–850 hPa), predominam correlações positivas, indicando que a presença de aerossóis absorvedores, como o carbono negro (AOD_BC), contribui significativamente para o aquecimento local, por meio do aumento do forçamento radiativo direto. Em contrapartida, correlações negativas foram observadas em biomas como o Pampa e na troposfera média, associadas à predominância de aerossóis dispersivos (AOD_SULF), que refletem a radiação solar e promovem resfriamento atmosférico.

As análises de tendência indicaram um aumento estatisticamente significativo da AOD_TOTAL durante a primavera, especialmente nas regiões sob influência direta das queimadas e do desmatamento. Paralelamente, observou-se uma elevação contínua da temperatura do ar ao longo de todas as estações, com maior intensidade no Centro-Oeste e Sudeste, compatível com os efeitos da urbanização e da mudança no uso do solo. Os dados oriundos do Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) permitiram identificar com precisão os padrões temporais e espaciais da influência dos aerossóis sobre o clima brasileiro, evidenciando a complexidade das interações entre composição de partículas, dinâmica atmosférica e variabilidade climática regional.

5. CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho investigou a influência dos aerossóis atmosféricos na temperatura do ar no Brasil, com base na análise da Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF) estimada pelo produto Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Os resultados obtidos ao longo dos dois artigos que compõem este trabalho evidenciaram a relevância dos aerossóis como moduladores climáticos, com efeitos distintos conforme a estação do ano, a localização geográfica e o nível da atmosfera analisado.

Inicialmente, verificou-se que o produto CAMS apresenta desempenho satisfatório na estimativa da AOD em diferentes biomas brasileiros, com alta correlação em diversos sítios da rede AERONET. No entanto, limitações em áreas com cobertura densa de nuvens, como na Amazônia, revelaram a necessidade de ajustes regionais e de maior integração com dados observacionais. Foi possível identificar sazonalidade marcante na AOD, com picos nos períodos de queimadas (especialmente primavera), associados a fontes antrópicas como desmatamento e manejo agrícola.

No segundo estudo, as análises espaciais e temporais da relação entre AOD_TOTAL, AOD_BC e AOD_SULF e temperatura do ar (Tar) demonstraram que essa interação é altamente dependente da altitude, da sazonalidade e das características locais dos biomas. Observou-se que aerossóis absorvedores, como o carbono negro, tendem a promover aquecimento próximo à superfície, especialmente na Amazônia, Cerrado e Pantanal. Em contraste, aerossóis dispersivos, presentes em regiões urbanas e subtropicais, mostraram relação negativa com a temperatura, destacando o papel resfriador de partículas como os sulfatos.

As análises de tendência revelaram padrões distintos e significativos nas estimativas de aerossóis atmosféricos e temperatura do ar no Brasil ao longo das estações. Destaca-se o aumento estatisticamente significativo da AOD_TOTAL durante a primavera, principalmente nos biomas Amazônia e Cerrado, em consonância com o avanço das queimadas e do desmatamento. Paralelamente, observou-se uma tendência consistente de elevação da temperatura do ar em todas as estações do ano, com maior intensidade nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e parte do Sul, refletindo os efeitos cumulativos da urbanização e alteração do uso da terra.

Embora os padrões de tendência do AOD_BC tenham variado conforme a região e a estação, observou-se uma tendência geral de estabilidade ou leve declínio, possivelmente relacionada à variabilidade interanual das queimadas e ao transporte atmosférico. Por outro lado, o AOD_SULF apresentou tendências mais heterogêneas, com reduções pontuais nas regiões Sul e Sudeste e aumentos localizados no Centro-Oeste e Nordeste, sugerindo influência direta de

fatores como crescimento urbano e fontes fixas de emissão. Os resultados aqui apresentados fornecem subsídios valiosos para o aprimoramento de modelos climáticos e o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos dos aerossóis sobre o clima e a saúde ambiental.

REFERÊNCIAS

- ADORNO, B. F. C. B., PIRATELLI, A. J., HASUI, E., RIBEIRO, M. C., & VAZ, P. G. (2025). Relative fire-proneness of land cover types in the Brazilian Atlantic forest. **Journal of Environmental Management**, 374, 124066. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124066>.
- ALBRECHT, B. A. (1989). Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. **Science**, 245(4923), 1227–1230. <https://doi.org/10.1126/science.245.4923.1227>.
- ALVES, A. M. de M. R.; MARTINS, F. B.; REBOITA, M. S. BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA ITAJUBÁ-MG: CENÁRIO ATUAL E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 26, 2020. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14239>. Acesso em: 31 jul. 2023.
- AMORIM, M. C. C. T. Daily evolution of urban heat islands in a Brazilian tropical continental climate during dry and rainy periods. **Urban Climate**, [S. l.], v. 34, p. 100715, 2020. ISSN 2212-0955. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100715>.
- ANDREAE, M. O., et al., (2012). Black carbon in the Amazon rainforest: A large contribution from biomass burning. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 12(24), 11689–11702.
- ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D. Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. **Science**, v. 321, n. 5894, p. 1309–1313, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1136529>.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; SHIMABUKURO, M. H. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, p. 536, 2018. DOI: 10.1038/s41467-017-02771-y.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E. The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD. **Science**, [S. l.], v. 328, n. 5983, p. 1275–1278, 2010. DOI: 10.1126/science.1186925.
- ARTAXO, P., RIZZO, L. V., BRITO, J. F., BARBOSA, H. M. J., ARANA, A., SENA, E. T., CIRINO, G. G., BASTOS, W., MARTIN, S. T., & ANDREAE, M. O. (2013). Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discussions**, 165, 203–235. <https://doi.org/10.1039/C3FD00052D>.
- ASUTOSH, A. et al. Investigation of June 2020 giant Saharan dust storm using remote sensing observations and model reanalysis. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 6114, 2022.
- AZIMI, M.N., RAHMAN, M.M., 2024. Unveiling the health consequences of air pollution in the world’s most polluted nations. **Sci. Rep.** 14, 9856. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60786-0>.
- BARTH, M., MCFADDEN, J. P., SUN, J., WIEDINMYER, C., CHUANG, P., COLLINS, D., GRIFFIN, R., HANNIGAN, M., KARL, T., KIM, S. W., LASHER-TRAPP, S., LEVIS, S., LITVAK, M., MAHOWALD, N., MOORE, K., NANDI, S., NEMITZ, E., NENES, A., POTOSNAK, M., ... STROUD, C. (2005). Coupling between land ecosystems and the atmospheric hydrologic cycle through biogenic aerosol pathways. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 86(12), 1738-1742. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-12-1738>.

BELLOUIN, N. et al. Bounding Global Aerosol Radiative Forcing of Climate Change. **Reviews of Geophysics**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. e2019RG000660, 2020.

BOND, T. C., et al. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 118(11), 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>

BORMA, L. S. et al. Beyond Carbon: The Contributions of South American Tropical Humid and Subhumid Forests to Ecosystem Services. **Reviews of Geophysics**, [s. l.], v. 60, n. 4, p. e2021RG000766, 2022.

BUDHAVANT, K., MANOJ, M. R., NAIR, H. R. C. R., GAITA, S. M., HOLMSTRAND, H., SALAM, A., MUSLIM, A., SATHEESH, S. K., AND GUSTAFSSON, Ö.: Changing optical properties of black carbon and brown carbon aerosols during long-range transport from the Indo-Gangetic Plain to the equatorial Indian Ocean, **Atmos. Chem. Phys.**, 24, 11911–11925, <https://doi.org/10.5194/acp-24-11911-2024>, 2024.

CALADO, P. A. D. P.; BARBOSA, E. I. G.; MARIANO, G. L. Análise da Espessura ótica dos Aerossóis do Sensor OMI na America do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 35, p. 1005–1016, 2021.

CHRISTENSEN, M. W., Y.-C. CHEN, AND G. L. STEPHENS (2016), Aerosol indirect effect dictated by liquid clouds, **J. Geophys. Res. Atmos.**, 121, 14,636–14,650, doi:[10.1002/2016JD025245](https://doi.org/10.1002/2016JD025245).

DA SILVA ESPINOZA, N. et al. Assessment of urban heat islands and thermal discomfort in the Amazonia biome in Brazil: A case study of Manaus city. **Building and Environment**, [s. l.], v. 227, p. 109772, 2023.

DA SILVA, H.J.A., BARBOSA, T.A. DOS S., LIMA, A.M. DE S., MAIONCHI, D. DE O., DA SILVA, J.G., MARQUES, J.B., PALÁCIOS, R. DA S., BIUDES, M.S., MACHADO, N.G., CURADO, L.F.A., 2025. Seasonal Impacts of Atmospheric Aerosols on Reference Evapotranspiration in the Mato Grosso Cerrado. **Atmosphere** 16, 203. <https://doi.org/10.3390/atmos16020203>.

DAHAL, S. et al. Aerosols over the Foothills of the Eastern Himalayan Region during Post-monsoon and Winter Seasons. **Aerosol and Air Quality Research**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 210152, 2022.

DE ANDRADE, C. F. et al. Fire regime in Southern Brazil driven by atmospheric variation and vegetation cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 295, p. 108194, 2020.

DE OLIVEIRA, A. 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 Ground-Based Lidar. **Atmosphere**, [s. l.], v. 10, n. 10, p. 594, 2019.

DE SALES, F. et al. Impacts of Protected Area Deforestation on Dry-Season Regional Climate in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 125, n. 16, p. e2020JD033048, 2020.

DUARTE, A. F. VARIABILIDADE E TENDÊNCIA DAS CHUVAS EM RIO BRANCO, ACRE, BRASIL. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [s. l.], v. 20, 2005.

EFRON, B., TIBSHIRANI, R.J., 1994. **An Introduction to the Bootstrap**. Chapman and Hall/CRC, New York. <https://doi.org/10.1201/9780429246593>.

ESKES, H., HUIJNEN, V., AROLA, A., BENEDICTOW, A., BLECHSCHMIDT, A.-M., BOTEK, E., BOUCHER, O., BOUARAR, I., CHABRILLAT, S., CUEVAS, E., ENGELEN, R., FLENTJE, H., GAUDEL, A., GRIESFELLER, J., JONES, L., KAPSOMENAKIS, J., KATRAGKOU, E., KINNE, S., LANGEROCK, B., RAZINGER, M., RICHTER, A., SCHULTZ, M., SCHULZ, M., SUDARCHIKOVA, N., THOURET, V., VREKOUSSIS, M., WAGNER, A., ZEREFOS, C., 2015. Validation of reactive gases and aerosols in the MACC global analysis and forecast system. *Geosci. Model Dev.* 8, 3523–3543. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3523-2015>.

FU, D. et al. Influences of atmospheric reanalysis on the accuracy of clear-sky irradiance estimates: Comparing MERRA-2 and CAMS. *Atmospheric Environment*, [s. l.], v. 277, p. 119080, 2022.

GARRIGUES, S., REMY, S., CHIMOT, J., ADES, M., INNESS, A., FLEMMING, J., KIPLING, Z., LASZLO, I., BENEDETTI, A., RIBAS, R., JAFARISERAJEHLLOU, S., FOUGNIE, B., KONDRAGUNTA, S., ENGELEN, R., PEUCH, V.-H., PARRINGTON, M., BOUSSEREZ, N., VAZQUEZ NAVARRO, M., AGUSTI-PANAREDA, A., 2022. Monitoring multiple satellite aerosol optical depth (AOD) products within the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) data assimilation system. *Atmospheric Chem. Phys.* 22, 14657–14692. <https://doi.org/10.5194/acp-22-14657-2022>.

GAVIDIA-CALDERÓN, M., SCHUCH, D., VARA-VELA, A., INOUE, R., FREITAS, E.D., ALBUQUERQUE, T.T. DE A., ZHANG, Y., ANDRADE, M. DE F., BELL, M.L., 2024. Air quality modeling in the metropolitan area of São Paulo, Brazil: A review. *Atmospheric Environ. Oxf. Engl.* 1994 319, 120301. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120301>.

GAVIDIA-CALDERÓN, M., SCHUCH, D., VARA-VELA, A., INOUE, R., FREITAS, E.D., ALBUQUERQUE, T.T. DE A., ZHANG, Y., ANDRADE, M. DE F., BELL, M.L. (2024). Air quality modeling in the metropolitan area of São Paulo, Brazil: A review. *Atmospheric Environment*, 319, 120301. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120301>

GIULIO, G. M. D. et al. EXTREME EVENTS, CLIMATE CHANGE AND ADAPTATION IN THE STATE OF SÃO PAULO. *Ambiente & Sociedade*, [s. l.], v. 22, p. e02771, 2019.

GOUVEIA, J. R. F. DE, NASCIMENTO, C. R., SILVA, H. C. DA, MOURA, G. B. DE A., & LOPES, P. M. O. (2024). Influência de eventos climáticos extremos na ocorrência de queimadas e no poder de regeneração vegetal. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 1098–1113. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1098-1113>.

GUEYMARD, C. A.; YANG, D. Worldwide validation of CAMS and MERRA-2 reanalysis aerosol optical depth products using 15 years of AERONET observations. *Atmospheric Environment*, [s. l.], v. 225, p. 117216, 2020.

GUPTA, H. V.; BEVEN, K. J.; WAGENER, T. Model Calibration and Uncertainty Estimation. Em: **ENCYCLOPEDIA OF HYDROLOGICAL SCIENCES**. [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. E-book. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470848944.hsa138>. Acesso em: 30 jul. 2023.

HANDSCHUH, J.; ERBERTSEDER, T.; BAIER, F. Systematic Evaluation of Four Satellite AOD Datasets for Estimating PM_{2.5} Using a Random Forest Approach. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 2064, 2023.

HOLANDA, B.A., FRANCO, M.A., WALTER, D., ARTAXO, P., CARBONE, S., CHENG, Y., CHOWDHURY, S., DITAS, F., GYSEL-BEER, M., KLIMACH, T., KREMPER, L.A., KRÜGER, O.O., LAVRIC, J.V., LELIEVELD, J., MA, C., MACHADO, L.A.T., MODINI, R.L., MORAIS, F.G., POZZER, A., SATURNO, J., SU, H., WENDISCH, M., WOLFF, S., PÖHLKER, M.L., ANDREAE, M.O., PÖSCHL, U., PÖHLKER, C., 2023. African biomass burning affects aerosol cycling over the Amazon. *Commun. Earth Environ.* 4, 1–15. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00795-5>.

HOLBEN, B. N. et al. AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 66, n. 1, p. 1–16, 1998.

HUỖNH, HÂN & MCNEILL, V. FAYE. (2024). The Potential Environmental and Climate Impacts of Stratospheric Aerosol Injection: A Review. **Environmental Science: Atmospheres**. 4. 10.1039/D3EA00134B.

INNESS, A. et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. **Atmospheric Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 19, n. 6, p. 3515–3556, 2019.

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

JIN, J., HENZING, B., & SEGERS, A. (2023). How aerosol size matters in aerosol optical depth (AOD) assimilation and the optimization using the Ångström exponent. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 23(3), 1641–1660. <https://doi.org/10.5194/acp-23-1641-2023>.

KENDALL, M.G., 1948. **Rank correlation methods, Rank correlation methods**. Griffin, Oxford, England.

KIPLING, Z. et al. What controls the vertical distribution of aerosol? Relationships between process sensitivity in HadGEM3–UKCA and inter-model variation from AeroCom Phase II. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, p. 2221–2241, 2016. DOI: 10.5194/acp-16-2221-2016.

KOCH, D.; DEL GENIO, A. D. (2010). Black carbon semi-direct effects on cloud cover: Review and synthesis. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 10(16), 7685–7696. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7685-2010>

KOREN, I., KAUFMAN, Y. J., REMER, L. A., & MARTINS, J. V. (2004). Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation. **Science**, 303(5662), 1342–1345. 10.1126/science.1089424.

KRAMER, R. J., SMITH, S. J., & FORSTER, P. M. (2024). Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth's energy imbalance. **Nature Communications Earth & Environment**, 5, 1324. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01324-8>

LANGEROCK, B., AROLA, A., BASART, S., BENEDICTOW, A., BENNOUNA, Y., BLECHSCHMIDT, A.-M., BOUARAR, I., CUEVAS, E., ERRERA, Q., ESKES, H.J., GRIESFELLER, J., KAPSOMENAKIS, J., MORTIER, A., PISON, I., PITKÄNEN, M.R.A., RAMONET, M., RICHTER, A., SCHULZ, M., TARNIEWICZ, J., THOURET, V., TSIKERDEKIS, A., WARNEKE, T., ZEREFOS, C., 2022. Validation report of the CAMS near-real-time global atmospheric composition service Period March – May 2022. <https://doi.org/10.24380/AKID-U2RR>.

LELIEVELD, J. et al. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. **Nature**, 525(7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>.

LI, J. et al. Aerosol optical depth (AOD): spatial and temporal variations and association with meteorological covariates in Taklimakan desert, China. **PeerJ**, [s. l.], v. 9, p. e10542, 2021.

LI, J., CARLSON, B.E., YUNG, Y.L. et al. Scattering and absorbing aerosols in the climate system. **Nat Rev Earth Environ** 3, 363–379 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00296-7>.

LI, J., WANG, W., LI, K., ZHANG, W., PENG, C., ZHOU, L., SHI, B., CHEN, Y., LIU, M., LI, H., GE, M., 2020. Temperature effects on optical properties and chemical composition of secondary organic aerosol derived from n-dodecane. **Atmospheric Chem. Phys.** 20, 8123–8137. <https://doi.org/10.5194/acp-20-8123-2020>.

LI, L., LI, M., FAN, X., CHEN, Y., LIN, Z., HOU, A., ZHANG, S., ZHENG, R., CHEN, J.: Measurement report: The variation properties of aerosol hygroscopic growth related to chemical composition during new particle formation days in a coastal city of Southeast China, **Atmos. Chem. Phys.**, 25, 3669–3685, <https://doi.org/10.5194/acp-25-3669-2025>, 2025.

LIU, L. et al. (2020). Impact of biomass burning aerosols on radiation, clouds, and precipitation over the Amazon: relative importance of aerosol–cloud and aerosol–radiation interactions. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 20(21), 13283–13301. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13283-2020>.

LIU, L., CHENG, Y., WANG, S., WEI, C., PÖHLKER, M.L., PÖHLKER, C., ARTAXO, P., SHRIVASTAVA, M., ANDREAE, M.O., PÖSCHL, U., SU, H., 2020. Impact of biomass burning aerosols on radiation, clouds, and precipitation over the Amazon: relative importance of aerosol–cloud and aerosol–radiation interactions. **Atmospheric Chem. Phys.** 20, 13283–13301. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13283-2020>.

LIZUNDIA-LOIOLA, J.; PETTINARI, M. L.; CHUVIECO, E. Temporal Anomalies in Burned Area Trends: Satellite Estimations of the Amazonian 2019 Fire Crisis. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 151, 2020.

LUIZ-SILVA, W., OSCAR-JÚNIOR, A.C., CAVALCANTI, I.F.A., TREISTMAN, F., 2021. An overview of precipitation climatology in Brazil: space-time variability of frequency and intensity

associated with atmospheric systems. **Hydrol. Sci. J.** 66, 289–308. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1863969>.

MACHADO, N. et al. Seasonal and interannual pattern of meteorological variables in Cuiabá, Mato Grosso state, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, [s. l.], v. 33, 2016.

MANN, H.B., 1945. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica** 13, 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>.

MARENGO, J. A. et al. Changes in climate and land use over the Amazon Region: current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 228, 2018. DOI: 10.3389/feart.2018.00228.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 1033–1050, 2016.

MATAVELI, G. A. V. et al. Characterization and trends of fine particulate matter (PM_{2.5}) fire emissions in the Brazilian Cerrado during 2002–2017. **Remote Sensing**, v. 11, n. 17, p. 2254, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11192254>. Acesso em: 17 maio 2025.

MIYAJI, R. O. ET AL. **Interpolação espacial de variáveis ambientais e aerossóis na região da Bacia Amazônica próxima a Manaus-AM**. Anais do XII Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA), 2021. DOI: 10.5753/wcama.2021.15741.

MONTEIRO DOS SANTOS, D., RIZZO, L.V., CARBONE, S., SCHLAG, P., ARTAXO, P., 2021. Physical and chemical properties of urban aerosols in São Paulo, Brazil: links between composition and size distribution of submicron particles. **Atmospheric Chem. Phys.** 21, 8761–8773. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8761-2021>.

MORAIS, F. G. et al. Relationship between Land Use and Spatial Variability of Atmospheric Brown Carbon and Black Carbon Aerosols in Amazonia. **Atmosphere**, [s. l.], v. 13, n. 8, p. 1328, 2022.

NOBRE, C. A. et al. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, [S. l.], v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016. DOI: 10.1073/pnas.1605516113.

OGUNJOBI, K. O.; AWOLEYE, P. O. Intercomparison and Validation of Satellite and Ground-Based Aerosol Optical Depth (AOD) Retrievals over Six AERONET Sites in West Africa. **Aerosol Science and Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 32–47, 2019.

OLIVEIRA, D. C. F. dos S. et al. Aerosol properties in the atmosphere of Natal/Brazil measured by an AERONET Sun-photometer. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 28, n. 8, p. 9806–9823, 2021.

PALÁCIOS, R. D. S. et al. VARIABILIDADE DA PROFUNDIDADE ÓTICA DE AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS SOBRE O PANTANAL BRASILEIRO (DEPTH OPTICAL VARIABILITY

OF ATMOSPHERIC AEROSOLS ON THE BRAZILIAN PANTANAL). **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 18, 2016. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/44340>.

PALÁCIOS, R. DA S., ROMERA, K.S., CURADO, L.F.A., BANGA, N.M., ROTHMUND, L.D., SALLO, F. DA S., MORAIS, D., SANTOS, A.C.A., MORAES, T.J., MORAIS, F.G., LANDULFO, E., FRANCO, M.A. DE M., KUHNEN, I.A., MARQUES, J.B., NOGUEIRA, J. DE S., JÚNIOR, L.C.G. DO V., RODRIGUES, T.R., 2020. Long Term Analysis of Optical and Radiative Properties of Aerosols in the Amazon Basin. **Aerosol Air Qual. Res.** 20, 139–154. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0189>

PALÁCIOS, R. et al. Evaluation of MODIS Dark Target AOD Product with 3 and 10 km Resolution in Amazonia. **Atmosphere**, [s. l.], v. 13, n. 11, p. 1742, 2022.

PALÁCIOS, R., CASTAGNA, D., BARBOSA, L., SOUZA, A.P., IMBIRIBA, B., ZOLIN, C.A., NASSARDEN, D., DUARTE, L., MORAIS, F.G., FRANCO, M.A., CIRINO, G., KUHN, P., SODRÉ, G., CURADO, L., BASSO, J., ROBERTO DE PAULO, S., RODRIGUES, T., 2024. ENSO effects on the relationship between aerosols and evapotranspiration in the south of the Amazon biome. **Environ. Res.** 250, 118516. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118516>.

PEARSON, K., FISHER, R.A., INMAN, H.F., 1994. Fisher on Statistical Tests: A 1935 Exchange from Nature. **Am. Stat.** 48.

PEARSON, K.; FISHER, R. A.; INMAN, H. F. Karl Pearson and R. A. Fisher on Statistical Tests: A 1935 Exchange from Nature. **The American Statistician**, [s. l.], v. 48, n. 1, p. 2, 1994.

PEDREIRA JÚNIOR, A.L.P., CURADO, L.F.A., PALÁCIOS, R. DA S., DOS SANTOS, L.O.F., QUERINO, C.A.S., QUERINO, J.K.A. DA S., RODRIGUES, T.R., MARQUES, J.B., 2025. Evaluation of Aerosol Optical Depth (AOD) estimated by Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) in Brazil. **Theor. Appl. Climatol.** 156, 116. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05335-5>.

PENDHARKAR, J. et al. Impact of Aerosol Size Distribution on Aerosol-Cloud Interaction in the Brazilian Atmospheric Global Model: A Case Study over South America. 23rd Conference on Atmospheric Chemistry -ACMAP: **Atmospheric Chemistry Modeling and Analysis Program**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003066526>. Acesso em: 30 jul. 2023.

PEREIRA, A. G. da C. et al. Aplicação dos produtos MODIS Coleção 6 na análise da Profundidade Ótica do Aerossol sobre regiões de Floresta e Cerrado na Amazonia Legal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 886–912, 2022.

PEREIRA, A. G. C., PALÁCIOS, R., SANTOS, P. C. R., PEREIRA, R. V. S., CIRINO, G., & IMBIRIBA, B. (2024). Relationship between El Niño-Southern Oscillation and Atmospheric Aerosols in the Legal Amazon. **Climate**, 12(2), 13. <https://doi.org/10.3390/cli12020013>.

PEREIRA, G. et al. Improving the south America wildfires smoke estimates: Integration of polar-orbiting and geostationary satellite fire products in the Brazilian biomass burning emission model (3BEM). **Atmospheric Environment**, [s. l.], v. 273, p. 118954, 2022.

PIVELLO, V. R. et al. Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 233–255, 2021.

PIVELLO, V. R., VIEIRA, I. C. G., CHRISTIANINI, A. V., RIBEIRO, D. B., PRADO, P. I., JOLY, C. A., ... & OVERBECK, G. E. (2021). Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 19(3), 233–255. DOI: 10.1016/j.pecon.2021.05.001.

POPE, R. J. et al. Substantial Increases in Eastern Amazon and Cerrado Biomass Burning-Sourced Tropospheric Ozone. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 47, n. 3, p. e2019GL084143, 2020.

PORFIRIO, A. C. S. et al. Evaluation of Global Solar Irradiance Estimates from GL1.2 Satellite-Based Model over Brazil Using an Extended Radiometric Network. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 1331, 2020.

PRADO, N. V.; DA COSTA COELHO, S. M. S. Estudo da Variabilidade Temporal da Profundidade Óptica do Aerossol Utilizando Dados de Sensoriamento Remoto Sobre a Região de Transição entre a Floresta Amazônica e o Cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 32, p. 649–658, 2017.

RAMOS, L.C., BRUNELLI, T.C., VICENTIN, F.C., CURADO, L.F.A., LIMA, A.M. DE S., MORAIS, F.G., PALÁCIOS, R. DA S., OLIVEIRA, N.N. DE, MARQUES, J.B., 2024. Characterization of the Elemental Composition of Aerosols Emitted in the Dry Season of the Pantanal Wetland, Brazil. **Atmosphere** 15, 1361. <https://doi.org/10.3390/atmos15111361>.

REBOITA, M. S. et al. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didactica**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 34, 2015.

ROCHA, V. R. da; YAMASOE, M. A. Estudo da variabilidade espacial e temporal da profundidade óptica do aerossol obtida com o MODIS sobre a região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 28, p. 210–220, 2013.

ROCHA-LIMA, A., MARTINS, J.V., REMER, L.A., TODD, M., MARSHAM, J.H., ENGELSTAEDTER, S., RYDER, C.L., CAVAZOS-GUERRA, C., ARTAXO, P., COLARCO, P., WASHINGTON, R., 2018. A detailed characterization of the Saharan dust collected during the Fennec campaign in 2011: in situ ground-based and laboratory measurements. **Atmospheric Chem. Phys.** 18, 1023–1043. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1023-2018>.

RODRIGUES, A. A. et al. Tendência e variabilidade da chuva no Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 32, p. 177–207, 2023.

SEN, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.* 63, 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.

SOUZA, A. de et al. Climate Regionalization in Mato Grosso do Sul: a Combination of Hierarchical and Non-hierarchical Clustering Analyses Based on Precipitation and Temperature. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 65, p. e22210331, 2022.

STEIDLE NETO, A.J., LOPES, D. DE C., 2018. Influência de Aerossóis Atmosféricos na Evapotranspiração de uma Região Semiárida no Nordeste do Brasil. **Rev. Bras. Meteorol.** 33, 677–683. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334009>.

STJERN, C. W., SAMSET, B. H., MYHRE, G., FORSTER, P. M., HODNEBROG, Ø., ANDREWS, T., ZHANG, H. (2020). How aerosols and greenhouse gases influence the diurnal temperature range. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 20(20), 13467–13486. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13467-2020>.

SU T, LI Z, HENAO NR, LUAN Q, YU F. Constraining effects of aerosol-cloud interaction by accounting for coupling between cloud and land surface. **Sci Adv.** 2024 May 24;10(21):eadl5044. doi: 10.1126/sciadv.adl5044. Epub 2024 May 23. PMID: 38781324; PMCID: PMC11114194

TARIQ, S. et al. Remote sensing of aerosols due to biomass burning over Kanpur, Sao-Paulo, Ilorin and Canberra. **Journal of Atmospheric Chemistry**, [s. l.], v. 80, n. 1, p. 1–52, 2023.

THORNHILL, G. et al. Climate-driven chemistry and aerosol feedbacks in CMIP6 Earth system models. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, p. 1105–1126, 2021. DOI: 10.5194/acp-21-1105-2021.

THORNHILL, G.D., RYDER, C.L., HIGHWOOD, E.J., SHAFFREY, L.C., JOHNSON, B.T., 2018. The effect of South American biomass burning aerosol emissions on the regional climate. **Atmospheric Chem. Phys.** 18, 5321–5342. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5321-2018>.

TORABI, S. E., AMIN, M., PHAIRUANG, W., LEE, H.-M., HATA, M., & FURUUCHI, M. (2024). High-Resolution Characterization of Aerosol Optical Depth and Its Correlation with Meteorological Factors in Afghanistan. **Atmosphere**, 15(7), 849. <https://doi.org/10.3390/atmos15070849>.

TWOMEY, S. (1977). The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 34(7), 1149–1152. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2)

VALIATI, R. et al. Near-field emission profiling of tropical forest and Cerrado fires in Brazil. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, p. 5619–5632, 2018. DOI: 10.5194/acp-18-5619-2018.

VAN DER WERF, G. R. et al. **Global Fire Emissions Database, Version 4.1 (GFEDv4.1s)**. Disponível em: <https://www.globalfiredata.org>.

VILLARDI, J. W. R., IGNOTTI, E., & HACON, S. S. (2023). Air pollution from forest burning as environmental risk for millions of inhabitants of the Brazilian Amazon and Central-West regions: An indicator of exposure. **Cadernos de Saúde Pública**, 39(8), e00131422. <https://doi.org/10.1590/0102-311XEN131422>.

WAGNER, A., BENNOUNA, Y., BLECHSCHMIDT, A.-M., BRASSEUR, G., CHABRILLAT, S., CHRISTOPHE, Y., ERRERA, Q., ESKES, H., FLEMMING, J., HANSEN, K.M., INNESS, A., KAPSOMENAKIS, J., LANGEROCK, B., RICHTER, A., SUDARCHIKOVA, N., THOURET, V., ZEREFOS, C., 2021. Comprehensive evaluation of the Copernicus Atmosphere

Monitoring Service (CAM5) reanalysis against independent observations: Reactive gases. **Elem. Sci. Anthr.** 9, 00171. <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00171>.

WILLIAMS, J. E. et al. Regional evaluation of the performance of the global CAM5 chemical modeling system over the United States (IFS cycle 47r1). **Geoscientific Model Development**, [s. l.], v. 15, n. 12, p. 4657–4687, 2022.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [s. l.], v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.

WU, C.; LI, K.; BAI, K. Validation and Calibration of CAM5 PM_{2.5} Forecasts Using In Situ PM_{2.5} Measurements in China and United States. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 12, n. 22, p. 3813, 2020.

YAMAGAMI, A., KAJINO, M., & MAKI, T. (2022). Statistical Evaluation of the Temperature Forecast Error in the Lower-Level Troposphere on Short-Range Timescales Induced by Aerosol Variability. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 127(6), e2022JD036595. <https://doi.org/10.1029/2022JD036595>.

YAMAGAMI, A., KAJINO, M., MAKI, T., 2022. Statistical Evaluation of the Temperature Forecast Error in the Lower-Level Troposphere on Short-Range Timescales Induced by Aerosol Variability. **J. Geophys. Res. Atmospheres** 127, e2022JD036595. <https://doi.org/10.1029/2022JD036595>.

YU, M. et al. The interaction between urbanization and aerosols during a typical winter haze event in Beijing. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, p. 9855–9870, 2020. DOI: 10.5194/acp-20-9855-2020.

ZHAO, C., LIU, X., LEUNG, L. R., GU, Y., & HAGOS, S. (2011). Radiative impact of mineral dust on monsoon precipitation variability over West Africa. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 11(4), 1879–1893. <https://doi.org/10.5194/acp-11-1879-2011>.

ZHOU, X. et al. Precipitation frequency controls nitrogenous aerosol in a tropical coastal city and its implications for plant carbon sequestration. **Chemosphere**, [S. l.], v. 326, p. 138473, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138473>.