Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
UFGD Editora

AVALIAÇÃO SAZONAL DO AEROSSOL E SUAS PROPRIEDADES ÓPTICAS NA ZONA LESTE DE SÃO PAULO

Seasonal Evaluation of Aerosol and its Optical Properties in The East Zone of São Paulo

Evaluación Estacional del Aerosol y sus Propiedades Ópticas en La Zona Este de São Paulo

Beatriz Macedo Ramos
Escola de Artes, Ciências e Humanidades - Universidade de São Paulo
biamacramos15@usp.br

Regina Maura de Miranda
Escola de Artes, Ciências e Humanidades - Universidade de São Paulo
remaura@usp.br

Resumo: Na cidade de São Paulo, as altas concentrações de material particulado fino ($MP_{2.5}$) na atmosfera trazem à tona os problemas relacionados à má qualidade do ar e à saúde humana. O presente trabalho teve como objetivo o estudo do $MP_{2.5}$ e suas propriedades ópticas na Zona Leste da capital. A partir de dados fornecidos pelas estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB, e por um fotômetro pertencente à rede AERONET (https://aeronet.gsfc.nasa.gov), foram analisados a variação temporal do $MP_{2.5}$, e os parâmetros profundidade óptica do aerossol (AOD), expoente de Ångström (AE) e albedo simples (SSA), no período entre 2017 e 2021. Os resultados mostraram que, ao longo dos 5 anos, as concentrações do poluente estudado ficaram acima do padrão diário de qualidade do ar da CETESB em 19 dias, e acima do valor recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 913 dias. A concentração média do $MP_{2.5}$ para o período foi de 17,79 µg/m³. As concentrações de $MP_{2.5}$, assim como os parâmetros AE, AOD e SSA, apresentaram picos em seus valores durante a estação seca, devido às condições meteorológicas desfavoráveis, influenciados pelas fontes locais e por aerossóis provenientes da queima de biomassa. Os resultados indicaram a necessidade de atenção por parte dos órgãos competentes para incentivar novas tecnologias e medidas que minimizem a emissão de poluentes, especialmente na Zona Leste de São Paulo, região densamente povoada, com a presença de indústrias e vias de grande tráfego de veículos.

Palavras-chave: Material particulado fino. Propriedades ópticas. São Paulo.

Abstract: In São Paulo the high concentrations of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in the atmosphere are related to poor air quality and health problems. The present work aimed to study the $MP_{2.5}$ and its

optical properties in the East Zone of São Paulo City. Data were provided by CETESB air quality monitoring stations, and by a photometer belonging to the AERONET network (https://aeronet.gsfc.nasa.gov). The temporal variation of $PM_{2.5}$, and the parameters Aerosol Optical Depth (AOD), Ångström exponent (AE) and Single Scattering Albedo (SSA), were analysed in the period between 2017 and 2021. The results showed that over the 5 years, the concentrations of the pollutant studied were above the CETESB daily air quality standard on 19 days, and above the World Health Organization (WHO) recommended value on 913 days. The average concentration of $PM_{2.5}$ for the period was 17.79 μg/m³. $PM_{2.5}$ concentrations, as well as AE, AOD and SSA parameters, presented peaks in their values during the dry season, due to unfavorable weather conditions, influenced by local sources and by aerosols from biomass burning. The results indicated the need for attention by the competent agencies to encourage new technologies and measures to minimize the emission of pollutants, especially in the East Zone of São Paulo, a densely populated region, with the presence of industries and high traffic roads.

Keywords: Fine particulate matter. Optical properties. São Paulo.

Resumen: En la ciudad de São Paulo, las altas concentraciones de material particulado fino ($MP_{2,5}$) en la atmósfera están relacionadas con la mala calidad del aire y problemas de salud. El objetivo del presente trabajo fue estudiar las concentraciones del $MP_{2.5}$ y sus propiedades ópticas en la Zona Este de São Paulo. A partir de datos proporcionados por las estaciones de monitoreo CETESB de la calidad del aire, y por un fotómetro perteneciente a la red AERONET (https://aeronet.gsfc.nasa.gov), fue obtenida la variación temporal del $MP_{2.5}$, y de los parámetros ópticos profundidad (AOD), exponente de Ångström (AE) y albedo simple (SSA), para el período de 2017 a 2021. Los resultados mostraron que, durante los 5 años, las concentraciones del $MP_{2.5}$ excedieron el estándar diario de calidad del aire CETESB en 19 días, y superó el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud en 913 días. La concentración media de $MP_{2.5}$ para el período fue de 17.79 μg/m³. Las concentraciones de $MP_{2.5,}$ así como los parámetros AE, AOD y SSA, presentaron picos en sus valores durante la estación seca, debido a condiciones climáticas desfavorables, influenciadas por fuentes locales y por aerosoles originarios de la quema de biomasa. Los resultados indican la necesidad de incentivar nuevas tecnologías y medidas que minimicen la emisión de contaminantes, especialmente en la Zona Este de São Paulo, una región densamente poblada, con presencia de industrias y alto tráfico de vehículos.

Palabras clave: Material particulado fino. Propiedades pticas. São Paulo.

Submetido em: 03/04/2023
Aceito para Publicação em: 17/11/2023
Publicado em: 19/11/2023

1. INTRODUÇÃO

As partículas sólidas e líquidas em suspensão, designadas aerossóis, são um dos principais constituintes atmosféricos, e desempenham um papel importante no balanço energético do planeta. Portanto, o conhecimento acerca de suas concentrações, composição química e propriedades ópticas é importante para avaliar o impacto dessas partículas no balanço de radiação e no clima (WILLEKE e BARON, 1993; TOLEDANO, 2005).

Dentre seus principais efeitos no clima, como a interação das partículas com a radiação solar, o efeito direto consiste na atenuação do feixe de luz, através das propriedades absorventes e espalhadoras das partículas; enquanto o denominado efeito indireto refere-se à capacidade dos aerossóis em interferir na formação de nuvens e de alterar suas propriedades ópticas e/ou microfísicas (SEINFELD e PANDIS, 2006; MAI et al., 2018). Como consequência da alteração do fluxo da radiação solar resultante de tais efeitos, pode haver interferência no clima regional, além da alteração das taxas de precipitação em escalas locais e regionais, em razão da influência na formação de nuvens (HALLQUIST et al., 2009; POESCHL et al., 2010; MARTIN et al., 2016, PALÁCIOS et al., 2020).

Apesar do conhecimento acerca de seus principais efeitos, o entendimento sobre o verdadeiro impacto dos aerossóis na forçante radiativa e no consequente balanço energético do planeta, ainda é limitado por uma gama de incertezas (WANG et al. 2016, IPCC 2018, OLIVEIRA et al 2021). Este campo de estudo é dificultado principalmente pela existência da enorme variabilidade nas formas, tamanhos e componentes que caracterizam a distribuição de tais partículas, que dependem fortemente das diversas fontes emissoras e mecanismos de transporte (PALÁCIOS et al., 2020). Desta forma, a classificação dos aerossóis pode ser obtida a partir de vários aspectos, dentre os quais destacam-se o tamanho, a origem referente ao seu processo de formação, o tipo de fonte emissora, a capacidade de absorção e suas propriedades ópticas.

As propriedades ópticas do aerossol atmosférico compreendem os principais parâmetros de sua interação com a radiação solar, uma vez que este processo engloba diferentes efeitos ópticos (OLIVEIRA, 2019). Usualmente detectadas por radiômetros e fotômetros, as mesmas refletem características importantes da camada de aerossol, em relação à distribuição de tamanho e propriedades das partículas. Portanto, o monitoramento

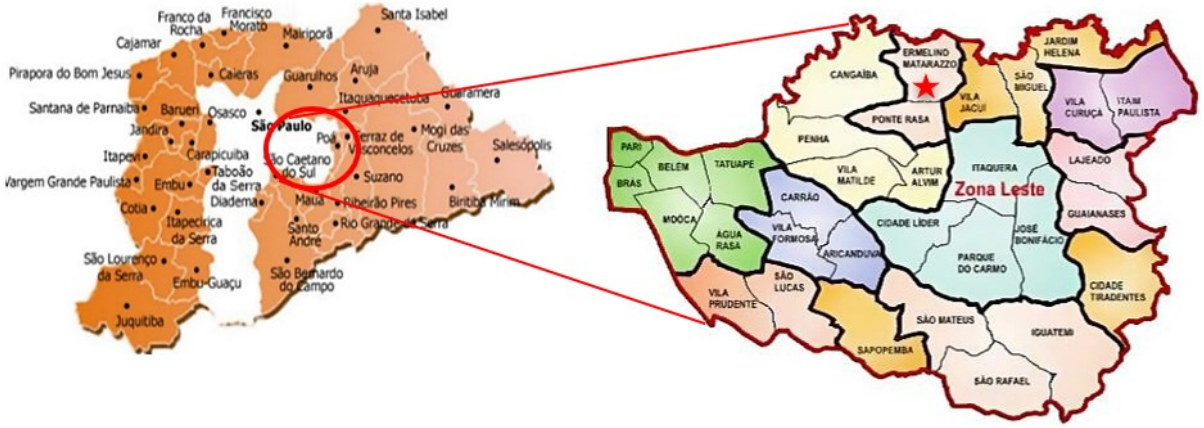
e análise das propriedades ópticas são de extrema importância ao proporcionarem um melhor entendimento acerca dos impactos do aerossol atmosférico no clima (MAI et al., 2018).

Além da influência dos aerossóis nos fluxos radiativos da atmosfera, o interesse dos cientistas sobre os aerossóis também tem sido despertado devido ao impacto destas partículas na saúde humana, principalmente nas áreas urbanas, onde as emissões de caráter antropogênico constituem a principal fonte. O $MP_{2.5}$, componente do aerossol atmosférico, traduz-se por partículas finas ou inaláveis cujos diâmetros aerodinâmicos são inferiores a 2,5 um. Devido ao menor diâmetro dessas partículas, quando comparado ao de partículas maiores, o $MP_{2.5}$ consegue penetrar de forma mais profunda no sistema respiratório, o que lhe confere maior potencial de causar efeitos adversos à saúde humana (BRITO et al., 2018). Este poluente é emitido principalmente por fontes de combustão e, nas áreas urbanas, a frota veicular constitui a maior fonte emissora (MIRANDA et al., 2012).

A cidade de São Paulo, consolidada como a principal metrópole brasileira, destaca-se por sua infraestrutura de radiais e complexos viários. Sua frota veicular, uma das maiores do mundo, contribui decisivamente para a poluição atmosférica regional (CASTANHO, 2005; SAYÃO, 2008; SILVA JÚNIOR, 2020).

A Zona Leste da capital paulista, que vem ocupando e consolidando uma importante posição econômica tanto em nível estadual quanto nacional, comporta um parque industrial moderno, diversificado e composto por segmentos de natureza complementar, destacando-se ainda pela presença de centros inovadores no campo das pesquisas científica e tecnológica. A figura 1 apresenta o mapa da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com destaque para a Zona Leste da cidade com seus principais distritos e bairros.

Figura 1 – Mapa da Região Metropolitana de São Paulo, destacando a Zona Leste da cidade e local de amostragens do material particulado e propriedades ópticas (estrela vermelha)



Fonte: Adaptado da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano-SMDU/Departamento de Produção e Análise de Informação – DEINFO; EMTU – Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (2022).

A RMSP possui 61 estações de qualidade do ar, várias localizadas no município de São Paulo. Apesar das políticas públicas aplicadas ao longo dos anos, a exemplo da imposição de fatores restritivos às emissões veiculares pelo Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE) e pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT), na Região Metropolitana de São Paulo as concentrações de Ozônio (O_3) e Material Partiulado fino ($MP_{2.5}$) seguem apresentando ultrapassagem dos padrões nacionais e estaduais (50 $\mu g/m^3$ em 24 hs para o $MP_{2.5}$ e 130 $\mu g/m^3$ em 8hs para o O_3) de qualidade do ar estabelecidos (CETESB 2023), conforme demonstrado por Andrade et al., (2017).

Diante da relevância do material particulado na poluição regional e local, e considerando a necessidade de compreender a influência dos aerossóis no clima, este trabalho teve como objetivo estudar a variação sazonal das concentrações de $MP_{2.5}$, assim como a variação das propriedades ópticas do aerossol na Zona Leste da cidade de São Paulo. Os parâmetros ópticos analisados foram a profundidade óptica (AOD), o coeficiente de Ångström (AE) e o albedo simples (SSA), para uma série temporal correspondente a cinco anos (2017 - 2021).

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Inserida no maior centro urbano do Brasil e quinta maior área urbana do mundo - a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), a cidade de São Paulo abrange uma área de 1.521 km^2, e é uma das cidades mais populosas do mundo, com população estimada de 11.451.999 habitantes (IBGE, 2022). A cidade de Guarulhos, também pertencente à RMSP, faz fronteira com a Zona Leste de São Paulo. As cidades de São Paulo e Guarulhos abrigam dois dos três maiores aeroportos brasileiros: o de Congonhas e o de Cumbica, o que contribui ainda mais para o grande fluxo de veículos que atravessam a capital paulista.

Situada à latitude de -23º32’ e -46º38’ de longitude, o clima da região onde está localizada a cidade de São Paulo é caracterizado principalmente por verões úmidos, com entrada de frentes frias, o que favorece a dispersão dos poluentes; e por invernos secos, quando as massas de ar provenientes do sul contribuem para menor intensidade de chuvas, uma condição favorável à alta concentração de poluentes na atmosfera (ROSÁRIO, 2006; SAYÃO, 2008).

Além do protagonismo das emissões veiculares e da atividade industrial em decorrência de sua grande infraestrutura de transportes, as condições meteorológicas e o transporte de aerossóis - a exemplo daqueles originados da queima de biomassa na região amazônica e interior do estado, também podem influenciar na concentração e composição do aerossol atmosférico local (MIRANDA et al., 2017; MOREIRA et al., 2021).

2.2 Dados de concentração e propriedades ópticas do aerossol

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) possui uma extensa rede de monitoramento, que permite aos cidadãos a consulta e a exportação de dados referente à qualidade do ar, para diversos parâmetros. A partir do Sistema de Qualidade do Ar (QUALAR-https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/), foram obtidos os dados referentes à concentração do material particulado inalável fino ($MP_{2.5}$) ao longo do período analisado (2017 a 2021). Os dados importados correspondem a dados horários, a partir dos quais também foram calculadas as médias diárias, mensais e anuais. A consulta aos dados referente às

concentrações de $MP_{2.5}$ foi feita para as estações de monitoramento correspondentes a Itaim Paulista, Guarulhos - Pimentas, e Guarulhos - Paço Municipal, situadas na Zona Leste de São Paulo.

A *Aerosol Robotic Network* (AERONET (https://aeronet.gsfc.nasa.gov/) é uma das principais redes que monitoram, através de fotômetros em superfície, as propriedades ópticas dos aerossóis. Estabelecida pela Agência Espacial Americana (NASA), a AERONET atua desde 1998 coletando dados em diversas regiões do mundo; visa, a partir de seus processos padronizados de instrumentação, processamento, calibração e distribuição, fornecer esses dados em escala global. Além da caracterização dos aerossóis, o fornecimento desses dados permite a validação de produtos de satélite e o sinergismo com outros tipos de medições aerossóis (HOLBEN et al., 1998; TOLEDANO, 2011). Foram estudados dados diários de profundidade óptica (AOD), coeficiente de Ângström (AE) e albedo simples (SSA), correspondente à série temporal (2017 - 2021), fornecidos por um fotômetro modelo CIMEL pertencente ao site SP - EACH, instalado na Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo, desde o ano de 2016.

O instrumento possui oito filtros de interferência - 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 e 1020 nm, a partir dos quais são realizadas as medições diretas em relação ao Sol e as medidas de radiação difusa; enquanto as medições diretas são utilizadas para determinar a profundidade óptica e o coeficiente de Ångström, a partir das medições referentes à radiação difusa é possível obter informações sobre as propriedades microfísicas dos aerossóis (RODRIGUES, 2016).

Dentre as versões de algoritmos a partir dos quais são fornecidos os produtos da AERONET - 1.0, 1.5 e 2.0, no presente estudo foram coletados os dados correspondentes à versão 1.5, na qual são removidos os dados contaminados por nuvens.

Por último, vez que as condições meteorológicas influenciam significativamente na concentração e distribuição dos poluentes, e a fim de associá-las com a variabilidade sazonal do $MP_{2.5}$, foram utilizados dados meteorológicos coletados na estação Mirante de Santana, estação meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (https://portal.inmet.gov.br).

Na figura 2 é possível visualizar a localização do site SP-EACH, assim como das redes de monitoramento de qualidade do ar CETESB.

Figura 2 - Localização do Site SP-EACH e redes de monitoramento da CETESB.



Fonte: Google Earth (2023).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Parâmetros ópticos

A Profundidade Óptica (AOD) indica o conteúdo vertical de aerossóis contido na coluna atmosférica, assim como a parcela de radiação atenuada pelas partículas (MATEOS et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2021). A partir do parâmetro anterior é obtido o coeficiente de Ângström (AE), que permite caracterizar a camada de aerossóis em relação à distribuição de tamanhos, uma vez que a forte relação inversa entre a dimensão da partícula e os valores de AE apontam para a dominância de moda fina ou de moda grossa (SEINFELD e PANDIS, 2006; MIRANDA et al., 2017). Já o albedo simples (SSA), resultante do cálculo da razão entre o coeficiente de espalhamento e o coeficiente de extinção (VALENZUELA et al., 2010), permite identificar a dominância de propriedades absorventes ou espalhadoras na camada de aerossóis, portanto este parâmetro é de extrema importância para estimar o impacto direto destas partículas. A Tabela 1 apresenta os valores mínimo (mín), máximo (máx), média, desvio padrão (DP) e número de valores diários (N) obtidos para cada mês dos anos de 2017 a 2021.

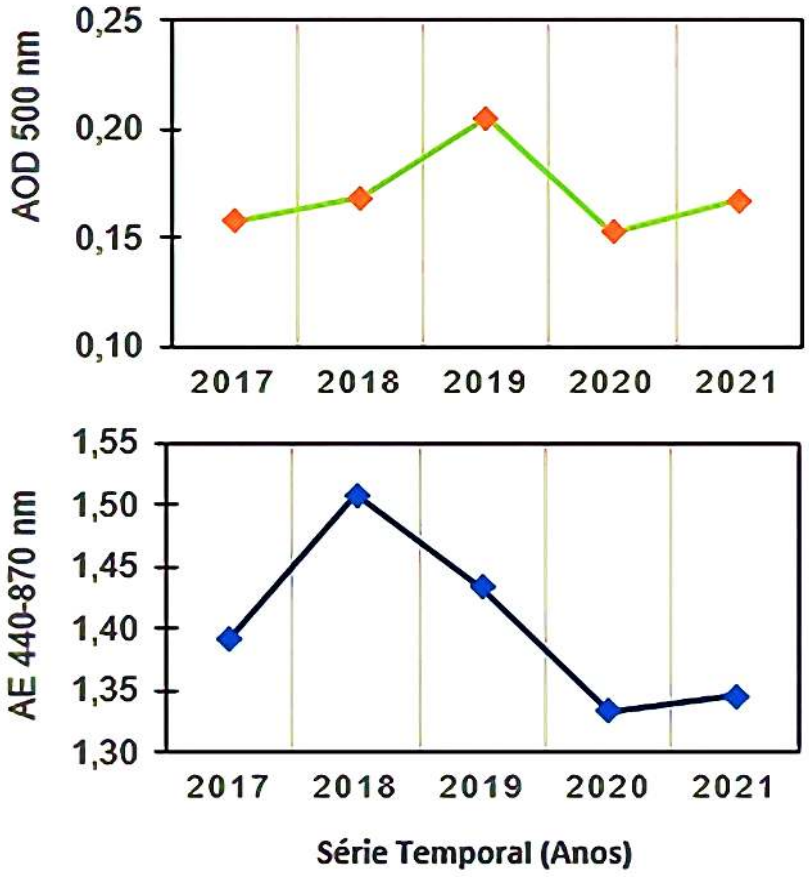
Tabela 1 - Valores obtidos da estação SP-EACH para SSA, AOD e AE em comprimentos de onda específicos ao longo da série temporal (2017-2021).

MÊS		2017					2018					2019					2020					2021				
		Mín	Máx	Média	DP	N	Mín	Máx	Média	DP	N	Mín	Máx	Média	DP	N	Mín	Máx	Média	DP	N	Mín	Máx	Média	DP	N
JANEIRO	AE 440-870 nm	0,97	1,54	1,31	0,16	249	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,94	1,62	1,27	0,18	474	0,96	1,48	1,20	0,14	231
	AOD 500 nm	0,07	0,31	0,15	0,08	249	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,09	0,38	0,18	0,09	474	0,05	0,30	0,13	0,08	231
	SSA 440 nm	0,38	0,95	0,74	0,32	3	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,86	0,93	0,90	0,03	14	0,86	0,94	0,90	0,04	4
	SSA 675 nm	0,88	0,90	0,89	0,02	3	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,74	0,91	0,86	0,07	14	0,67	0,90	0,82	0,12	4
	SSA 870 nm	0,86	0,87	0,86	0,01	3	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,69	0,91	0,83	0,09	14	0,54	0,89	0,76	0,19	4
FEVEREIRO	AE 440-870 nm	1,19	1,79	1,49	0,30	5	-	-	-	-	0	1,24	1,82	1,64	0,21	144	1,08	1,40	1,25	0,11	219	0,56	1,56	1,31	0,22	640
	AOD 500 nm	0,08	0,11	0,10	0,02	5	-	-	-	-	0	0,11	0,49	0,23	0,14	144	0,08	0,20	0,13	0,04	219	0,06	0,21	0,12	0,05	640
	SSA 440 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,89	0,96	0,94	0,03	11	0,84	0,98	0,93	0,05	7	0,78	0,98	0,90	0,06	26
	SSA 675 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,89	0,95	0,93	0,03	11	0,79	0,97	0,89	0,07	7	0,74	0,97	0,87	0,07	26
	SSA 870 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,88	0,94	0,91	0,03	11	0,74	0,97	0,87	0,09	7	0,66	0,94	0,83	0,09	26
MARÇO	AE 440-870 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,79	1,59	1,32	0,19	1262	0,96	1,51	1,28	0,15	824
	AOD 500 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,06	0,37	0,17	0,08	1262	0,09	0,32	0,17	0,06	824
	SSA 440 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,82	1,00	0,93	0,04	36	0,81	0,95	0,88	0,05	27
	SSA 675 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,83	1,00	0,91	0,05	36	0,76	0,98	0,86	0,07	27
	SSA 870 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,79	1,00	0,89	0,05	36	0,73	0,98	0,83	0,08	27
ABRIL	AE 440-870 nm	-	-	-	-	0	1,35	1,55	1,45	0,08	20	-	-	-	-	0	0,97	1,49	1,23	0,18	533	0,81	1,52	1,21	0,19	781
	AOD 500 nm	-	-	-	-	0	0,11	0,25	0,17	0,05	20	-	-	-	-	0	0,07	0,39	0,14	0,08	533	0,06	0,22	0,14	0,05	781
	SSA 440 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,86	0,95	0,91	0,03	29	0,84	0,99	0,92	0,06	29
	SSA 675 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,84	0,92	0,89	0,03	29	0,80	0,99	0,90	0,07	29
	SSA 870 nm	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,83	0,91	0,87	0,03	29	0,79	0,99	0,88	0,07	29
MAIO	AE 440-870 nm	1,15	1,53	1,28	0,14	194	1,10	1,60	1,42	0,14	290	-	-	-	-	0	1,23	1,50	1,34	0,10	226	1,01	1,62	1,33	0,15	1052
	AOD 500 nm	0,08	0,19	0,15	0,05	194	0,03	0,28	0,16	0,07	290	-	-	-	-	0	0,10	0,29	0,16	0,07	226	0,08	0,26	0,17	0,04	1052
	SSA 440 nm	0,90	0,97	0,93	0,04	4	0,80	0,99	0,93	0,06	28	-	-	-	-	0	0,85	0,98	0,89	0,06	15	0,78	1,00	0,89	0,06	64
	SSA 675 nm	0,88	0,97	0,92	0,05	4	0,80	0,99	0,92	0,05	28	-	-	-	-	0	0,81	0,98	0,87	0,07	15	0,77	0,99	0,87	0,06	64
	SSA 870 nm	0,86	0,97	0,91	0,05	4	0,80	0,99	0,91	0,05	28	-	-	-	-	0	0,78	0,98	0,85	0,08	15	0,76	0,99	0,85	0,06	64
JUNHO	AE 440-870 nm	1,04	1,54	1,35	0,12	457	1,33	1,62	1,50	0,15	6	-	-	-	-	0	0,89	1,43	1,17	0,18	602	0,91	1,57	1,32	0,19	665
	AOD 500 nm	0,06	0,15	0,10	0,02	457	0,17	0,43	0,34	0,15	6	-	-	-	-	0	0,06	0,14	0,09	0,03	602	0,09	0,32	0,17	0,06	665
	SSA 440 nm	0,85	0,99	0,94	0,05	10	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,85	0,93	0,88	0,03	38	0,83	0,98	0,90	0,04	51
	SSA 675 nm	0,82	0,99	0,92	0,07	10	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,78	0,90	0,84	0,04	38	0,80	0,97	0,88	0,05	51
	SSA 870 nm	0,78	0,99	0,90	0,08	10	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,76	0,87	0,82	0,04	38	0,78	0,97	0,87	0,06	51
JULHO	AE 440-870 nm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,76	1,59	1,23	0,23	1294	1,09	1,51	1,27	0,14	454
	AOD 500 nm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,07	0,27	0,15	0,06	1294	0,05	0,33	0,15	0,09	454
	SSA 440 nm	0,82	1,00	0,91	0,07	11	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,82	0,95	0,89	0,04	102	0,78	0,96	0,87	0,06	33
	SSA 675 nm	0,78	0,99	0,90	0,07	11	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,82	0,95	0,87	0,04	102	0,76	0,95	0,85	0,06	33
	SSA 870 nm	0,74	0,99	0,89	0,08	11	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	0,79	0,94	0,85	0,04	102	0,72	0,94	0,83	0,07	33
AGOSTO	AE 440-870 nm	-	-	-	-	0	1,26	1,59	1,43	0,10	214	0,94	1,61	1,35	0,17	608	0,84	1,53	1,21	0,20	1692	0,96	1,68	1,36	0,22	938
	AOD 500 nm	-	-	-	-	0	0,11	0,29	0,16	0,05	214	0,12	0,34	0,19	0,06	608	0,06	0,35	0,16	0,07	1692	0,06	0,92	0,32	0,24	938
	SSA 440 nm	-	-	-	-	0	0,86	0,95	0,92	0,03	25	0,84	0,92	0,88	0,03	28	0,78	0,98	0,88	0,04	116	0,83	0,99	0,89	0,05	71
	SSA 675 nm	-	-	-	-	0	0,85	0,94	0,90	0,03	25	0,82	0,90	0,86	0,03	28	0,76	0,97	0,86	0,05	116	0,82	0,99	0,87	0,05	71
	SSA 870 nm	-	-	-	-	0	0,85	0,93	0,89	0,03	25	0,79	0,87	0,84	0,03	28	0,72	0,97	0,84	0,06	116	0,80	0,99	0,85	0,06	71
SETEMBRO	AE 440-870 nm	1,01	1,61	1,42	0,14	1959	1,05	1,90	1,54	0,17	510	1,12	1,76	1,49	0,16	984	1,16	1,72	1,44	0,15	1438	0,97	1,68	1,44	0,19	1271
	AOD 500 nm	0,08	0,59	0,28	0,14	1959	0,08	0,50	0,24	0,12	510	0,06	1,49	0,38	0,32	984	0,17	1,84	0,48	0,34	1438	0,10	0,62	0,37	0,14	1271
	SSA 440 nm	0,79	0,99	0,90	0,05	70	0,87	0,99	0,94	0,03	63	0,86	0,95	0,90	0,03	49	0,84	0,97	0,91	0,03	78	0,88	0,99	0,93	0,03	63
	SSA 675 nm	0,81	0,99	0,90	0,05	70	0,81	0,99	0,93	0,04	63	0,83	0,94	0,88	0,03	49	0,82	0,97	0,90	0,04	78	0,82	0,99	0,91	0,04	63
	SSA 870 nm	0,80	0,99	0,90	0,05	70	0,79	0,99	0,92	0,05	63	0,79	0,93	0,85	0,04	49	0,80	0,96	0,88	0,05	78	0,79	0,99	0,89	0,04	63
OUTUBRO	AE 440-870 nm	1,01	1,70	1,44	0,18	869	1,19	1,67	1,43	0,18	102	1,24	1,69	1,45	0,11	1312	1,30	1,61	1,46	0,11	509	1,22	1,62	1,49	0,10	282
	AOD 500 nm	0,11	0,48	0,24	0,09	869	0,09	0,41	0,22	0,11	102	0,15	0,45	0,25	0,10	1312	0,14	0,74	0,33	0,21	509	0,15	0,38	0,23	0,07	282
	SSA 440 nm	0,89	0,97	0,92	0,02	24	0,93	0,99	0,96	0,02	10	0,87	0,99	0,92	0,04	57	0,92	0,95	0,93	0,01	29	0,92	1,00	0,96	0,03	11
	SSA 675 nm	0,89	0,96	0,92	0,02	24	0,92	0,99	0,95	0,02	10	0,85	0,99	0,91	0,04	57	0,87	0,94	0,90	0,02	29	0,87	0,99	0,94	0,05	11
	SSA 870 nm	0,87	0,96	0,91	0,03	24	0,90	0,99	0,95	0,03	10	0,83	0,99	0,89	0,05	57	0,85	0,92	0,88	0,03	29	0,82	0,99	0,93	0,06	11
NOVEMBRO	AE 440-870 nm	1,09	1,70	1,40	0,20	377	1,04	2,01	1,49	0,26	90	1,21	1,60	1,42	0,11	600	1,03	1,77	1,44	0,16	1125	1,03	1,44	1,31	0,14	702
	AOD 500 nm	0,09	0,26	0,14	0,05	377	0,06	0,26	0,15	0,06	90	0,12	0,27	0,20	0,04	600	0,08	0,52	0,19	0,10	1125	0,11	0,21	0,17	0,03	702
	SSA 440 nm	0,91	0,95	0,93	0,03	6	0,93	1,00	0,96	0,04	4	0,88	0,98	0,94	0,03	27	0,86	0,99	0,94	0,03	42	0,84	0,99	0,92	0,06	25
	SSA 675 nm	0,93	0,95	0,94	0,02	6	0,93	1,00	0,96	0,05	4	0,86	0,97	0,92	0,03	27	0,86	0,99	0,92	0,04	42	0,82	0,99	0,90	0,06	25
	SSA 870 nm	0,91	0,94	0,92	0,02	6	0,93	1,00	0,96	0,05	4	0,83	0,96	0,90	0,04	27	0,81	0,99	0,90	0,05	42	0,79	0,99	0,88	0,07	25
DEZEMBRO	AE 440-870 nm	-	-	-	-	0	1,40	1,63	1,55	0,09	80	0,40	1,61	1,23	0,35	643	0,38	1,59	1,19	0,27	396	-	-	-	-	0
	AOD 500 nm	-	-	-	-	0	0,12	0,19	0,16	0,03	80	0,09	0,47	0,18	0,11	643	0,03	0,25	0,10	0,06	396	-	-	-	-	0
	SSA 440 nm	-	-	-	-	0	0,87	0,99	0,94	0,06	6	0,91	0,97	0,94	0,02	20	0,83	0,94	0,91	0,05	5	-	-	-	-	0
	SSA 675 nm	-	-	-	-	0	0,86	0,99	0,94	0,07	6	0,87	0,95	0,91	0,03	20	0,81	0,94	0,89	0,06	5	-	-	-	-	0
	SSA 870 nm	-	-	-	-	0	0,88	0,99	0,94	0,05	6	0,85	0,94	0,89	0,03	20	0,74	0,93	0,87	0,09	5	-	-	-	-	0

Fonte: AERONET (2022). Elaborado pelos autores (2023).

Para os parâmetros AOD 500 nm e AE 440 - 870 nm, não houve variações significativas entre as médias anuais, variando entre 0,15 e 0,20, para o AOD; e entre 1,33 e 1,50, para o AE. A figura 3 mostra a variação interanual em relação aos valores médios obtidos para os parâmetros AOD 500 nm e AE 440 - 870 nm.

Figura 3 - Médias anuais dos valores de AOD 500 nm e AE 440-870 nm para o período de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em relação ao AOD 500 nm, as médias anuais correspondentes a 2017, 2018, 2019 e 2021 foram muito próximas, variando entre 0,15 e 0,16. O ano de 2019 obteve a maior média anual, igual a 0,20. No entanto, deve-se considerar que, para este ano, houve ausência de dados para os meses de janeiro, março, abril, maio e junho (tabela 1), nos quais concentram-se os valores mais baixos de AOD devido à maior ocorrência de chuvas. Consequentemente, isso pode ter influenciado o valor da média anual diante do número muito maior de dados correspondentes à estação seca.

Apesar da proximidade dos valores anuais (2017-2021) médios obtidos ao analisar os parâmetros AOD 500 nm e AE 440-870 nm, conforme observado na figura 3, ao comparar os valores mensais apresentados na tabela 1, nota-se valores de desvio padrão mais elevados concentrados nos meses correspondentes à estação seca (julho a outubro), indicando uma maior variabilidade destes parâmetros em relação às médias mensais durante esta época do ano.

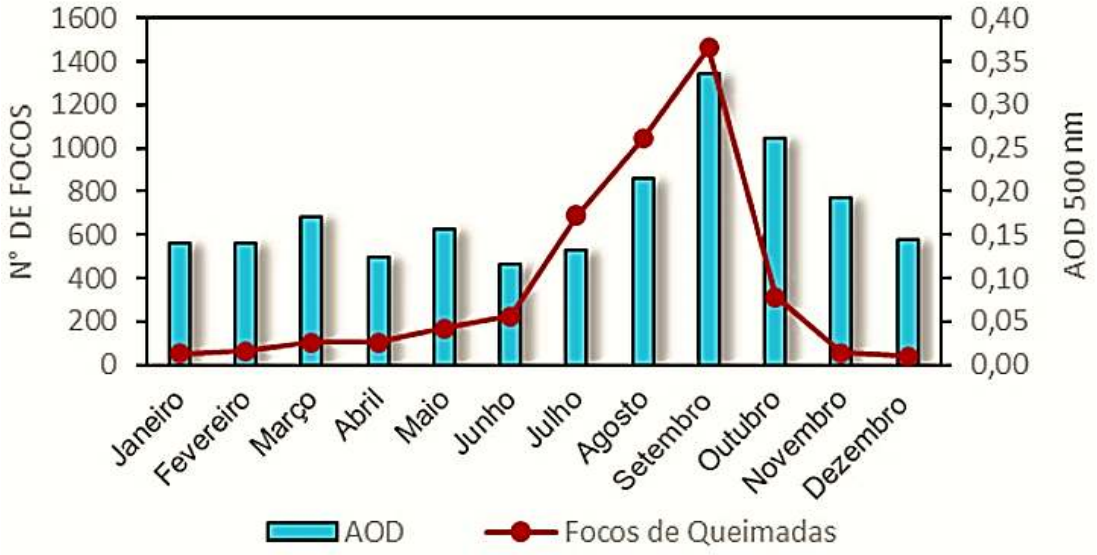
Ao longo da série temporal, a maior parte dos valores diários obtidos para o AOD 500 nm correspondem àqueles abaixo de 0,1. No entanto, valores extremos acima de 0,6 foram registrados nos meses de agosto a outubro, uma vez que esta época do ano costuma ser caracterizada pela ocorrência de atividades de queimadas, que sofrem aumento expressivo em todo o país (PRADO et al., 2017). Infere-se que a variabilidade e picos nos valores do AOD estejam associados, principalmente, com o aumento da emissão local e condições meteorológicas desfavoráveis, e transporte de aerossóis provenientes da queima de biomassa.

Além disso, os valores máximos encontrados para os anos de 2019 a 2021 em relação ao AOD 500 nm, foram bem maiores em comparação com aqueles registrados para os anos anteriores. Os valores máximos diários registrados nos anos de 2017 e 2018 foram, respectivamente, 0,58 e 0,59. Já os máximos correspondentes aos anos de 2019, 2020 e 2021, compreendem, respectivamente, os valores de 1,48, 1,84 e 1,92. Deve-se destacar que nos últimos anos, houve um significativo aumento do número de focos de queimadas no Estado de São Paulo. De acordo com dados do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), o número de focos registrados para 2017, 2018 e 2019 foram, respectivamente, 3.902, 3.019 e 3.074. Em 2020, São Paulo registrou a maior quantidade de focos de queimadas no estado dentro do período analisado, com um total de 6.123 focos. No ano de 2021, o número de focos registrados caiu para 5.469, ao mesmo tempo em que os valores máximos diários de AOD 500 nm foram menores do que aqueles registrados no ano anterior. Para ambos os anos, os meses de agosto, setembro e outubro concentraram mais de 71% da quantidade anual total de focos.

A variabilidade dos valores de AOD é frequentemente atribuída aos focos de queimadas, a exemplo do estudo realizado por Palácios et al., (2018), cujos resultados apresentaram uma forte correlação entre os parâmetros anteriores. Assim, foi feita uma análise da variabilidade mensal do AOD 500 nm em função dos registros de focos de

queimadas para o Estado de São Paulo. A figura 4 apresenta a distribuição mensal dos focos de queimadas, assim como dos valores de AOD 500 nm, para toda a série. Observa-se uma forte relação entre o parâmetro óptico e o número de focos, principalmente entre os meses de julho e outubro.

Figura 4 - Variação mensal do AOD 500nm e relação com focos de queimadas no Estado de São Paulo para o período entre 2017 e 2021.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Corrobora-se que a variabilidade da AOD 500 nm na área de estudo é influenciada por aerossóis provenientes de queimadas durante a estação seca. O parâmetro pode atingir altos valores quando plumas de queimadas atingem São Paulo (LEMES et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021).

Em relação ao parâmetro AE 440 - 870 nm, observou-se que, durante a estação seca, este parâmetro tende, assim como o AOD 500 nm, a um aumento em seus valores, uma vez que aproximadamente 73% dos valores mais altos (> 1,7) correspondem aos meses de setembro a novembro. A exemplo, o dia 11 de novembro de 2018 obteve um valor igual a 2, o maior valor de AE registrado ao longo de toda a série temporal. O período em que estes picos nos valores do AE ocorreram na Zona Leste de São Paulo, apontam para o aumento dos valores deste parâmetro relacionado à queima expressiva de biomassa durante a temporada de queimadas no Brasil (ECK et al., 2005).

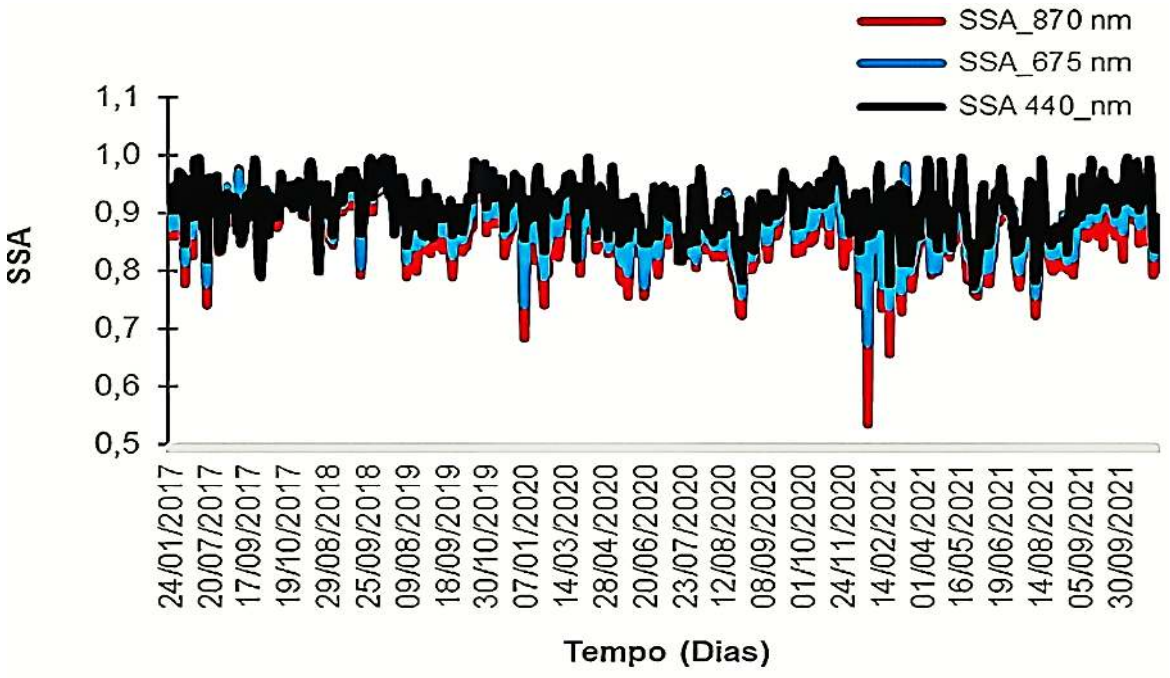
De forma geral, 88% dos valores de AE 440 - 870 nm concentram-se entre 1 e 1,6. As partículas de pequeno tamanho geralmente estão associadas a valores acima de 1, enquanto valores mais próximos de zero caracterizam partículas maiores que constituem, por exemplo, a poeira (KAUFAMN et al., 1998; OLIVEIRA, 2019). Portanto, no local de estudo, a distribuição dos valores do parâmetro AE indica a dominância de partículas finas, considerando que no local as principais fontes locais são os veículos (MIRANDA et al., 2017). Segundo Anmyon, Beijing e Shirahama apud Eck et al (2005), estes valores também apontam para uma atmosfera constituída principalmente pela mistura de partículas grossas e finas de aerossóis, além da presença de moda de acumulação de grande porte resultante da coagulação de partículas finas em altas concentrações; e do crescimento higroscópico, já que em São Paulo o aerossol secundário como sulfatos e nitratos tem forte componente (CETESB, 2023).

De forma atípica, poucos dias ao longo da série temporal apresentaram valores de AE 440 - 870 nm abaixo de 1. A exemplo, para os dias 16 de dezembro de 2019, 21 de dezembro de 2019, 2 de dezembro de 2020 e 8 de fevereiro de 2021, os valores diários obtidos foram iguais a, respectivamente, 0,40, 0,56, 0,37 e 0,56, sendo que todos os demais dias obtiveram valores de AE maiores/iguais a 0,76. Tais valores indicam, nestes dias, uma atípica disseminação de partículas grossas na atmosfera local. Diversos autores evidenciam a ocorrência de eventos relacionados ao transporte de aerossóis, a exemplo da influência de pó mineral de origem transcontinental na atmosfera local demonstrada por Oliveira et al., (2021), que, ao alterar temporariamente a composição da camada de aerossóis local, alterou os valores dos parâmetros ópticos, incluindo um decrescimento significativo em relação ao parâmetro AE. Assim, os raros valores que apontam para a dominância de aerossol de moda grossa em dias específicos podem estar relacionados ao transporte e influência de aerossóis provenientes de outras regiões.

Ao analisar a distribuição dos valores de SSA em 440 nm, 675 nm e 870 nm ao longo da série temporal, é possível observar, na figura 5, o decrescimento dos valores do parâmetro com o aumento de comprimento de onda, o que reflete a dependência espectral das partículas (ROMERA et al., 2019). As médias anuais de SSA variaram entre 0,86 e 0,91; valores que coincidem com aqueles encontrados por Romera et al., 2019, para o site de Cuiabá de 2000 a 2016, refletindo a dominância de partículas espalhadoras. Portanto, em relação ao

impacto direto dos aerossóis no contexto local, infere-se que a radiação foi muito mais espalhada ao longo da série temporal do que absorvida.

Figura 5 - Variação do SSA 440 nm, 675 nm e 870 nm ao longo da série temporal.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

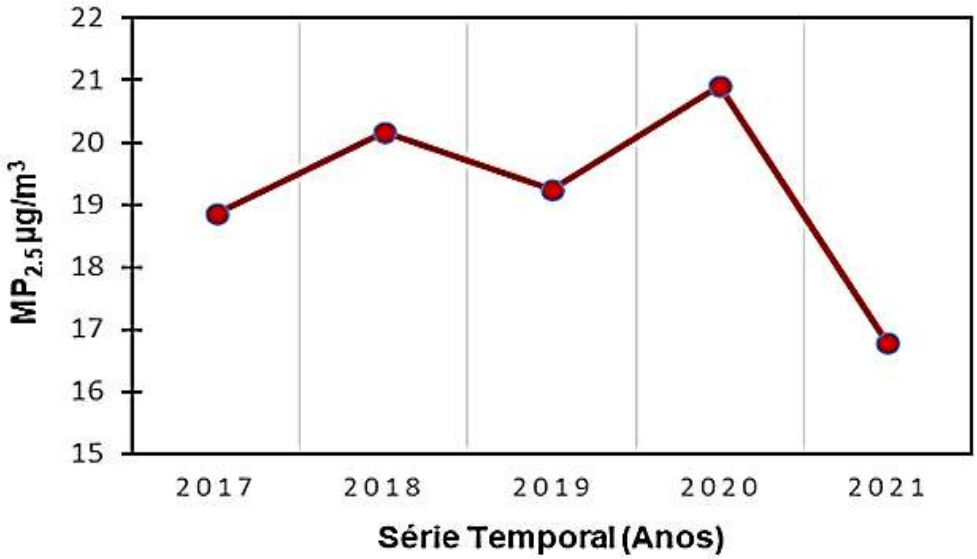
3.2 Material particulado fino ($MP_{2.5}$)

A partir dos dados horários em relação à concentração do $MP_{2.5}$ obtidos pela plataforma QUALAR, foram calculadas as concentrações diárias para o poluente nas estações da Zona Leste da capital paulista, com disponibilidade de dados: Itaim Paulista, Guarulhos Pimentas e Guarulhos Paço Municipal. Foram calculadas médias diárias, anuais e mensais para cada uma das três estações, a fim de analisar a distribuição temporal do poluente no local de estudo. A tabela 2 apresenta os valores mínimo (Mín), máximo (Máx), média e desvio padrão (DP) obtidos para o $MP_{2.5}$ ao longo da série temporal para todos os meses do ano. Na figura 6 também é possível visualizar a variação anual das concentrações $MP_{2.5}$ na Zona Leste de São Paulo, entre os anos de 2017 e 2021.

No geral, foi observada uma grande variabilidade em relação aos valores do $MP_{2.5}$, com concentrações diárias entre 2,67 µg/m^3 e 72,61 µg/m^3; e médias mensais, entre 9,31 µg/m^3 e

36,21 µg/m³. Não houve variação anual significativa entre as médias aritméticas correspondentes aos anos de 2017 a 2020. No entanto, o ano de 2021 apresentou um forte decaimento nas concentrações de $MP_{2.5}$ em relação aos anos anteriores, apresentando a menor média anual ao longo do período analisado, igual a 15,42 µg/m³.

Figura 6 - Médias aritméticas anuais das concentrações de $MP_{2.5}$ correspondentes aos anos de 2017 a 2021.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Conforme os padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Art. 9 do Decreto Estadual nº 59113/2013, valores vigentes a partir de 2022, o valor orientador em relação às concentrações de $MP_{2.5}$ no Estado de São Paulo é 50 µg/m³ de concentração, para o período de 24 horas, e de 17 µg/m³, para a média aritmética anual (CETESB, 2023). No entanto, a Organização Mundial da Saúde estabelece o valor máximo de 15 µg/m³ para a média de 24 horas; e 5 µg/m³, para a média anual.

No local de estudo, com exceção do ano de 2021, para todos os demais anos foram obtidas médias aritméticas acima do padrão estadual. Em relação aos dados diários, apresentaram concentrações médias diárias que ultrapassaram o padrão CETESB estabelecido para a média de 24 horas os dias: 30 de agosto de 2017, 02 de junho, 02, 07, 14, 15, 16 e 17 de julho de 2018, 13 e 14 de julho de 2019, 01 de junho, 06, 12, 13, 14, 18 e 19 de setembro de 2020, e 21 e 23 de agosto de 2021, totalizando 19 dias.

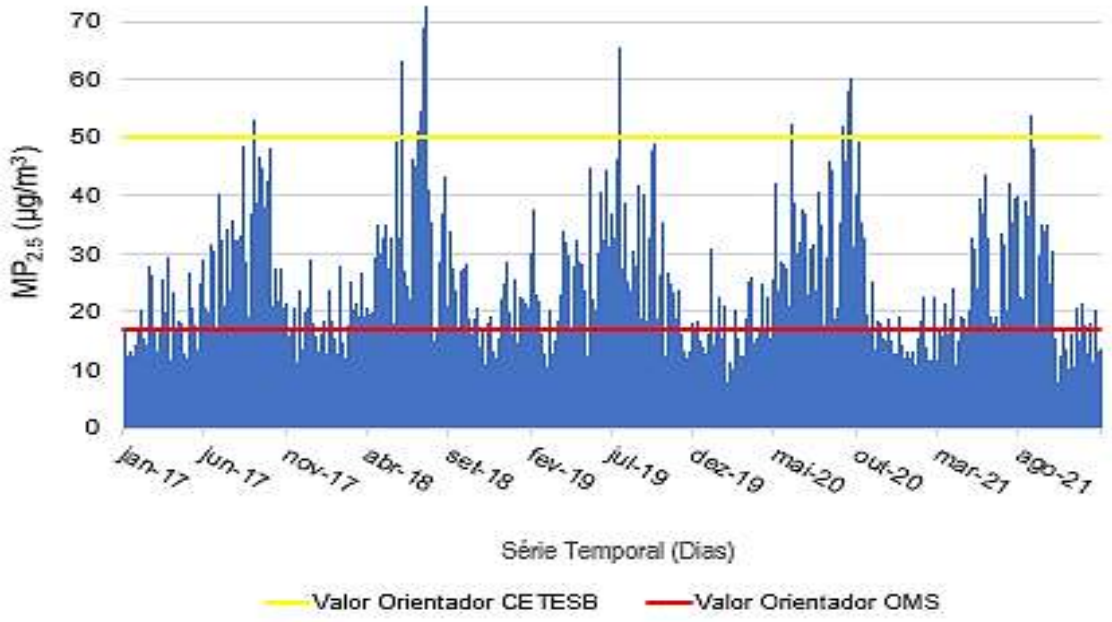
Com base nos valores sugeridos pela OMS, em todos os anos foi ultrapassado o padrão recomendado para a média aritmética; e em 913 dias, correspondente a 50% dos dados diários, foi ultrapassada a média de 24 horas. Na figura 7 é possível visualizar os dados diários nos quais a concentração de $MP_{2.5}$ ultrapassou o padrão estadual e o valor orientador pela OMS estabelecidos para a média de 24 horas.

Tabela 2 – Valores mensais obtidos de $MP_{2.5}$ a partir da média entre as estações Itaim Paulista, Guarulhos-Paço Municipal e Guarulhos-Pimentas ao longo da série temporal (2017-2021).

MÊS	2017				2018				2019				2020				2021			
	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP
JANEIRO	5,17	20,25	11,11	3,33	7,27	23,83	13,52	4,04	7,18	25,65	15,69	4,79	4,90	30,97	12,78	5,76	5,43	22,49	11,75	3,91
FEVEREIRO	7,75	27,97	15,59	5,47	6,07	27,81	12,64	4,75	6,83	37,74	15,50	6,88	3,96	20,50	10,40	3,80	6,50	22,69	10,51	3,42
MARÇO	5,63	29,36	12,86	5,48	8,46	26,71	16,55	4,78	5,61	23,10	12,00	4,34	5,14	25,98	14,90	5,45	5,74	24,00	13,54	4,47
ABRIL	7,18	23,19	12,14	4,14	5,57	35,18	19,95	8,13	5,49	33,75	18,30	8,11	9,18	37,17	17,01	6,24	4,33	20,27	11,29	4,55
MAIO	9,83	29,13	16,89	5,89	5,29	49,40	22,82	9,85	5,73	44,91	18,95	8,86	10,46	45,94	22,65	8,77	5,08	43,63	20,21	10,69
JUNHO	6,85	40,45	19,98	8,15	6,73	63,19	25,44	13,94	8,55	44,61	25,89	9,43	8,65	52,43	24,46	10,79	7,10	33,63	16,08	6,96
JULHO	7,00	35,85	22,57	7,94	8,32	72,61	36,21	16,34	7,68	65,63	25,88	13,98	10,89	40,63	24,62	7,71	6,56	42,04	25,70	10,90
AGOSTO	6,21	53,31	21,57	11,99	6,52	43,44	17,84	9,37	5,27	42,00	18,16	10,23	7,98	45,99	24,22	10,96	5,07	53,90	23,59	15,17
SETEMBRO	9,47	48,32	31,91	9,94	5,61	28,81	17,77	6,18	4,13	49,03	20,72	12,92	9,75	60,15	35,45	13,74	4,31	35,03	21,14	8,41
OUTUBRO	5,97	27,47	17,30	5,95	6,14	28,10	12,78	5,05	7,65	35,25	18,35	6,49	12,00	49,29	23,05	9,86	2,67	19,75	9,31	4,23
NOVEMBRO	6,78	23,85	12,89	4,35	5,51	19,22	11,68	3,58	4,97	22,79	11,77	4,10	6,54	18,73	13,68	3,33	3,96	21,39	10,93	4,91
DEZEMBRO	8,75	28,92	14,96	5,23	8,31	28,58	16,10	5,23	6,75	19,15	12,16	3,37	6,31	19,24	11,43	2,85	4,17	20,44	10,54	4,08

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

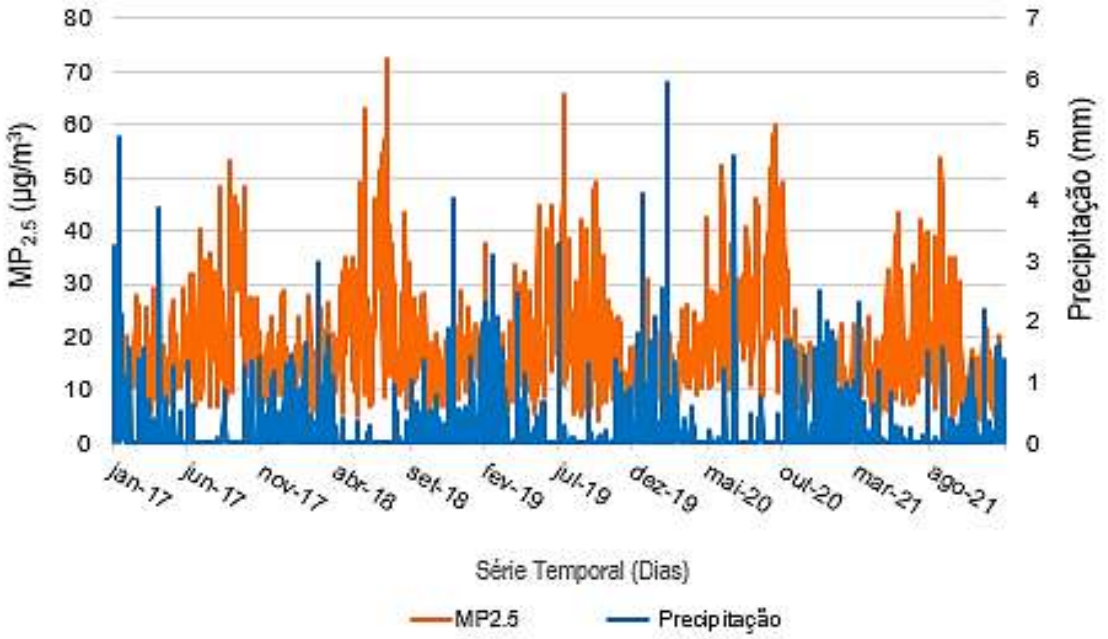
Figura 7 – Valores diários de $MP_{2.5}$ para a série temporal de 2017 a 2021 e valores orientadores estabelecidos pela CETESB e OMS para a qualidade do ar.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Comparando-se as médias anuais (figura 6), observou-se que as concentrações do $MP_{2.5}$, entre 2017 e 2020, apresentaram um aumento de um ano para o outro (até 2020). Durante este período, as médias anuais variaram entre 17,47 µg/m^3, em 2017; e 19,57 µg/m^3; em 2020. No ano de 2021, esperava-se que as concentrações do $MP_{2.5}$ tivessem aumentado em relação ao ano anterior em decorrência da redução do volume de chuvas, uma vez que a precipitação favorece a dissolução e o carreamento de partículas poluentes, sendo, por vezes, um dos principais fatores que incidem na alteração das concentrações do material particulado na atmosfera (SANTOS et al., 2019). A média de precipitação total em 2021 total foi igual a 0,13 mm, bem inferior àquela observada no ano de 2020, igual a 0,19 mm. Além disso, observou-se que há uma forte relação inversa entre os dois parâmetros no local de estudo. A figura 8 mostra a distribuição dos volumes totais de precipitação diários, assim como as concentrações de $MP_{2.5}$ ao longo da série temporal.

Figura 8 – Relação entre precipitação total e concentrações de $MP_{2.5}$ ao longo da série temporal.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os valores mais altos de $MP_{2.5}$ ocorreram durante a estação seca, nos meses de julho a outubro, com o decaimento dos volumes diários de precipitação. Da mesma forma, as menores concentrações do poluente ocorreram durante a estação chuvosa. Portanto, o decaimento na média anual do $MP_{2.5}$, em 2021, mesmo diante da redução significativa do volume de precipitação em relação ao ano anterior, mostrou-se atípico. No entanto, é importante considerar, que de 2020 para 2021, houve a maior variação interanual em relação ao número total de focos de queimadas registrados no Estado de São Paulo (INPE, 2022). Assim, infere-se que este decaimento das concentrações de $MP_{2.5}$, no ano de 2021, esteja relacionado com o número bem inferior de focos de queimadas registrados no mesmo ano (5.469 focos), em relação ao ano anterior (6.123 focos), representando uma redução de 10,68%. Observa-se que, apesar do ano de 2021 ter apresentado menor média anual em relação ao $MP_{2.5}$, isso não refletiu nas médias anuais dos parâmetros AOD e AE, que aumentaram em relação a 2020. Portanto, mesmo com o decaimento das concentrações do poluente, os demais parâmetros indicaram altas concentrações de aerossóis na coluna atmosférica e a predominância de moda fina. Além dos focos de queimadas, também deve ser considerado o contexto da pandemia de COVID-19 e a redução do tráfego de veículos resultante das medidas de restrição impostas, o que possivelmente contribuiu para a redução

das emissões do $MP_{2.5}$ no ano de 2021, assim como demonstraram Rosse et al., (2020) associando as mudanças de padrão dos poluentes na cidade de São Paulo às medidas de isolamento social.

3.3 Estudo de caso para o mês de setembro de 2020

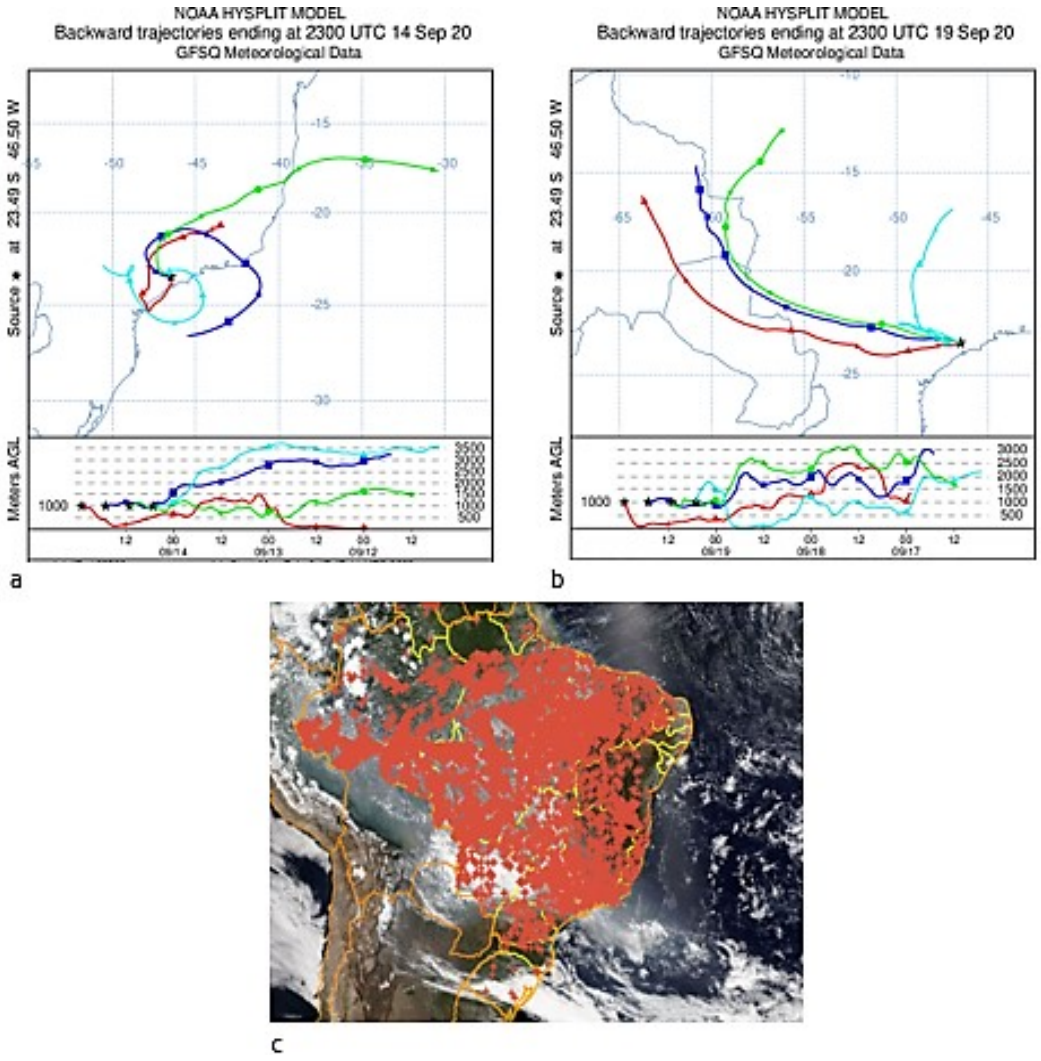
Os períodos nos quais as concentrações de $MP_{2.5}$ ultrapassaram o padrão estadual de 50 µg/m³ correspondem a dois principais meses: o mês de julho de 2018 e o mês de setembro de 2020. Entre os dias 19 de junho de 2018 e 19 de agosto do mesmo ano, não foram obtidas medições dos parâmetros ópticos AOD e AE para o site SP-EACH. Em relação ao mês de setembro de 2020, foi possível notar um aumento significativo nos parâmetros AOD e AE durante o período, que apresentou concentrações extremas do poluente, correspondente aos dias 12 de setembro de 2020 ($MP_{2.5}$ = 53,93 µg m^3), 13 de setembro de 2020 ($MP_{2.5}$ = 53,56 µg m^3), 14 de setembro de 2020 ($MP_{2.5}$ = 58,04 µg m^3), 18 de setembro de 2020 ($MP_{2.5}$ = 55,0 µgm^3) e 19 de setembro de 2020 ($MP_{2.5}$ = 60,14 µg m^3). Em relação ao parâmetro SSA, não foram constatadas variações significativas.

Os picos acima em relação às concentrações do poluente foram acompanhados por picos nos valores dos parâmetros ópticos. A exemplo, para o dia 18 de setembro de 2020 ($MP_{2.5}$ = 55,0 µgm^3) foram obtidos, respectivamente, o maior valor de AOD 500 nm (1,84), e o segundo maior valor de AE 440 - 870 nm (1,72) registrados na Zona Leste de São Paulo ao longo da série temporal, indicando a contribuição do poluente para o aumento na concentração de partículas finas de aerossóis, como demonstrado por Miranda et al., (2017).

A fim de investigar as possíveis causas que levaram às altas concentrações do $MP_{2.5}$ acompanhadas pela elevação dos parâmetros ópticos AOD, AE e SSA nos dias 12, 13, 14, 18 e 19 de setembro de 2020, assim como a origem das partículas de aerossóis, foi utilizado o modelo HYSPLIT para identificar a origem das massas de ar que chegaram a São Paulo durante este período (retrotrajetórias de 72 horas).

A figura 9 (a e b) mostra as trajetórias calculadas para os dias 14 e 19 de setembro de 2020, de parcelas de ar com origem no interior do país chegando a São Paulo. A figura 9c mostra a quantidade de focos de queimadas no país no período de 12 a 19 de setembro de 2020.

Figura 9– Trajetórias das massas de ar calculadas no modelo HYSPLIT para setembro de 2020 e focos de queimadas no Brasil no período de 12 a 19 de setembro de 2020.



Fonte: HYSPLIT MODEL (2023); https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal

Para os dois períodos, observa-se que as massas de ar são provenientes principalmente das regiões central do país e interior do estado de São Paulo. Para os dois dias, a chegada das parcelas coincide com os picos de concentração e AOD. Nestes dias, o transporte de plumas de queimada possivelmente contribuiu para o aumento nos parâmetros estudados, como já evidenciado em outros períodos (MOREIRA et al., 2021)

Cabe ressaltar que, durante o mês de setembro de 2020, a atuação de um sistema de alta pressão que levou ao predomínio de massas de ar quente e seco no Estado de São Paulo, resultando em uma condição de estabilidade atmosférica desfavorável à dispersão dos poluentes (CETESB, 2021).

Considerando que os valores elevados do $MP_{2.5}$ e dos parâmetros ópticos coincidiram com o período marcado pelos altos índices de queimadas, e uma vez que a modelagem das trajetórias referente aos dois períodos para o mês de setembro de 2020 apontaram a origem das massas de ar nas regiões centrais do país, observa-se a possibilidade de que, além da condição de escassez de chuvas favorável às altas concentrações de poluentes, o aumento nos valores dos parâmetros seja decorrente do transporte de aerossóis provenientes de queima de biomassa até o local de estudo.

4. CONDISERAÇÕES FINAIS

A partir dos registros fornecidos pela plataforma QUALAR e rede AERONET (2017 - 2021), o estudo da variação sazonal do $MP_{2.5}$ e das propriedades ópticas, assim como das características dos aerossóis, demonstrou a predominância de baixos valores de $MP_{2.5}$, AE, AOD e SSA durante a estação chuvosa; e um crescimento expressivo das concentrações do poluente e dos parâmetros ópticos durante a estação seca. A relação destes altos valores com o aumento do número de focos de queimadas nesta época do ano sugerem a influência de aerossóis de queima de biomassa transportadas de outras regiões do país, corroborada pelas trajetórias das massas de ar obtidas no modelo HYSPLIT para o mês de setembro de 2020. Para os demais meses, apesar de menores as concentrações de $MP_{2.5}$, uma significativa quantidade de dias ultrapassaram os padrões recomendados pela OMS. Os resultados deste estudo sugerem a necessidade das autoridades locais de implementarem medidas de redução de emissões de material particulado fino. Embora o Programa Brasileiro de Controle de Emissões de Poluição Atmosférica por Veículos Automotores (PROCONVE) estabelecido em 1983 tenha sido eficaz na redução dos níveis de poluentes atmosféricos, incorporando estratégias voltadas para a melhora da qualidade do ar (a exemplo da melhoria na qualidade dos combustíveis automotivos, bem como a aplicação de leis para impor limites às emissões veiculares através da modernização dos motores, entre outros) (ANDRADE et al., 2017), outras ações são necessárias para melhorar a qualidade do ar e consequentemente a saúde humana na capital paulista; a exemplo das restrições de tráfego e inspeções de veículos, melhor fiscalização em relação às atividades de queimadas, investimento em transporte público, dentre outras políticas públicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo financiamento da pesquisa: CNPq (Projeto PIBIC 2021-776) e FAPESP (Processo 2018/25226-5).

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. F., KUMAR, P., FREITAS, E. D. YNOUE, R. Y., MARTINS, J., MARTINS, L. D., NOGUEIRA, T., MARTINEZ, P. P., MIRANDA, R. M., ALBUQUERQUE, T., GONÇALVES, F. L. T., OYAMA, B., ZHANG, Y. 2017. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, 159, p. 66-82, 2017. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.051

BRITO, P. H. F., ARAÚJO, R. S., SILVA, G. M. M. Composição química do material particulado atmosférico: uma revisão de literatura. **Revista Holos**, v. 4, p. 62-74, 2018. https://doi.org/10.15628/holos.2018.4648

CASTANHO, A. D.A. Propriedades ópticas das partículas de aerossol e uma nova metodologia para a obtenção de profundidade óptica via satélite sobre São Paulo. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo - 2020. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>. Acesso em: jul. 2022.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo - 2022. São Paulo: CETESB, 2023. Disponível em: <http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>. Acesso em: set. 2023.

ECK, T. F., HOLBEN, B.N., DUBOVIK, O. et al. Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. **Journal of Geophysal Research**, v. 110, D06202, 2005. https://doi.org/10.1029/2004JD005274

HALLQUIST, M., WENGER, J.C., BALTENSPERGER, U., RUDICH, Y., SIMPSON, D., CLAEYS, M., DOMMEN, J., DONAHUE, N.M., GEORGE, C., GOLDSTEIN, A.H., HAMILTON, J.F., HERRMANN, H., HOFFMANN, T., IINUMA, Y., JANG, M., JENKIN, M.E., JIMENEZ, J.L., KIENDLER-SCHARR, A., MAENHAUT, W., MCFIGGANS, G., MENTEL, TH.F., MONOD, A., PRÉVÔT, A.S. H., SEINFELD, J.H., SURRATT, J.D., SZMIGIELSKI, R. AND WILDT, J. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: Current and emerging issues. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, p. 5155–5236, 2009. https://doi.org/10.5194/acp-9-5155-2009

HOLBEN, B.N., ECK, T.F., SLUTSKER, I., TANRE, D., BUIS, J.P., SETZER, A., VERMOTE, E., REAGAN, J.A., KAUFMAN, Y.J., NAKAJIMA, T., LAVENU, F., JANKOWIAK, I., SMIRNOV, A. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterizations. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, p. 1-16, 1998. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo brasileiro de 2022. Disponível em: < https://censo2022.ibge.gov.br/ >. São Paulo: IBGE, 2022. Acesso em: set. 2023.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Portal Do Monitoramento De Queimadas E Incêndios, 2022. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>. Acesso em: ago. 2022.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Special report: global warming of 1.5 °C. Cambridge University Press, Nova Iorque, 2018.

KAUFMAN, Y. J. et al. Smoke, clouds, and radiation-Brazil (SCAR-B) experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 31.783-31.808, 1998. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/98JD02281/pdf

LEMES, M.C.R, REBOITA, M.S., CAPUCIN, B.C. Impactos das queimadas na Amazônia no tempo em São Paulo na tarde do dia 19 de agosto de 2019. **Revista Brasileira de Geografia Física,** v.13, n.3, p. 983-993, 2020. https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe

MAI, B., DENG, X., XIA, X., CHE, H., GUO, J., LIU, X.., & LING, C. Column-integrated aerosol optical properties of coarse-and fine-mode particles over the Pearl River Delta region in China. **Science of the Total Environment**, v. 622, p. 481-492, 2018. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.348

MARTIN, S.T., ARTAXO, P., MACHADO, L.A.T., MANZI, A.O., SOUZA, R.A.F., SCHUMACHER, C., WANG, J., ANDREAE, M.O., BARBOSA, H.M.J., FAN, J., FISCH, G., GOLDSTEIN, A.H., GUENTHER, A., JIMENEZ, J.L., PÖSCHL, U., SILVA DIAS, M.A., SMITH, J.N. AND WENDISCH, M. Introduction: observations and modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon2014/5). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, p. 4785–4797, 2016. https://doi.org/10.5194/acp-16-4785-2016

MATEOS, D., CACHORRO, V.E., TOLEDANO, C., et al. Columnar and surface aerosol load over the Iberian Peninsula establishing annual cycles, trends, and relationships in five geographical sectors. **Science of the Total Environment,** v. 518-519**,** p. 378-392, 2015. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.002

MIRANDA, R. M., ANDRADE, F. M., FORNARO, A., ASTOLFO, R., ANDRE, P. A., & SALDIVA, P. Urban air pollution: a representative survey of PM2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v.5, p. 63-77, 2012. https://doi.org/10.1007/s11869-010-0124-1

MIRANDA, R. M., LOPES, F., ROSÁRIO, N. É., YAMASOE, M. A., LANDULFO, E., & ANDRADE, F. M. The relationship between aerosol particles chemical composition and optical properties to identify the biomass burning contribution to fine particles concentration: a case study for São Paulo city, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.189, p. 1-15, 2017. https://doi.org/10.1007/s10661-016-5659-7

MOREIRA, G.A., ANDRADE, I.S., CACHEFFO, A., LOPES, F.J.S., YOSHIDA, A.C., GOMES, A.A., SILVA, J.J., LANDULFO, E. Influence of a biomass-burning event in PM2.5 Concentration and Air Quality: A Case Study in the Metropolitan Area of São Paulo. **Sensors**, v. 21, n. 2, p. 425, 2021. https://doi.org/10.3390/s21020425

OLIVEIRA, D. C. F. S. Propriedades ópticas de aerossóis na atmosfera de Natal/Brasil medidas por meio de um fotômetro solar da rede AERONET. 2019. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

OLIVEIRA, D. C. F. S., MONTILLA-ROSERO, E., LOPES, F. J. S., MORAIS, F. G., LANDULFO, E., HOELZEMANN, J. J. Aerosol properties in the atmosphere of Natal/Brazil measured by an AERONET Sun-photometer. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 8, p. 9806-9823, 2021. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11373-z

PALÁCIOS, R.S., SALLO, F.S., MARQUES, J. B., SANTOS, A. C. A., MENEZES, J. A., BIUDES, M. S., & DE SOUZA NOGUEIRA, J. Variabilidade espaço-temporal da profundidade ótica de aerossóis em regiões de cerrado e Pantanal na região central do Brasil. **Nativa**, v.6, n.1, p. 56-65, 2018.

PALÁCIOS, R. S., ROTHMUND, L. D., SALLO, F. S., et al. Long-Term analysis of optical and radiative properties of aerosols in the Amazon Basin. **Aerosol and Air Quality Research**, Taiwan, v. 20, n. 1, p. 139-154, 2020. https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0189

PÖSCHL, U., et al. Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon. **Science**, v. 329, n. 5998, p. 1513-1516, 2010. https://doi.org/10.1126/science.1191056

PRADO, N. V., & da COSTA COELHO, S. M. S. (2017). 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**, v. 32, p. 649-658, 2017. https://doi.org/10.1590/0102-7786324012

RODRIGUES, F. Análise da profundidade óptica do aerossol obtida a partir de distintas plataformas na região de Campo Grande/MS. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2016.

ROMERA, K. S., MUSIS, C. R., PALÁCIOS, R.S., CURADO, L. F. A., NOGUEIRA, J. S., MARQUES, J. B., & DUARTE, L. G. Variabilidade interanual das propriedades óticas de aerossóis em biomas distintos na Amazônia Legal. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019. http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.61621

ROSÁRIO, N. M. E do. Comparação de profundidades ópticas espectrais do aerossol obtidas para São Paulo a partir de um Multifilter Rotating Shadowband Radiometer e do fotômetro solar da AERONET. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ROSSE, V.P., PEREIRA, J.N., BOARI, A., COSTA, G.V., RIBEIRO, J.P., VIEIRA-FILHO, M. São Paulo's atmospheric pollution reduction and its social isolation effect, Brazil. **Air Quality, Atmosphere & Health**, p. 543-52, 2021. https://doi.org/10.1007/s11869-020-00959-8

SANTOS, F. S. D., PINTO, J. A., MACIEL, F. M., HORTA, F. S., ALBUQUERQUE, T. T. D. A., & ANDRADE, M. D. F. Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP 2,5) em Belo Horizonte, MG. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v.24, p. 371-381, 2019.

SAYÃO, A. C. Estudo da variabilidade sazonal da profundidade óptica do aerossol em São Paulo a partir de radiômetros MFRSR. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SEINFELD, J.H., PANDIS, S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 2ªed. **John Wiley & Sons, Inc**., Nova Iorque, 2006.

SILVA JÚNIOR, R.S., MARTILLI, A., SILVA, E.H.L. Efeito da urbanização sobre a dispersão de poluentes e formação de ilha de calor. **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 27, 2020. https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.69398

TOLEDANO, C. O Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación" el arenosillo" de la red aeronet. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências) - Departamento de Física Teórica, Atômica e Ótica, Universidade de Valladolid, Valladolid, 2005.

VALENZUELA, A., OLMO, F. J., LYAMANI, H., QUIRANTES, A., ALADOS- ARBOLEDAS, L. Aerosol properties retrieved from sky radiance at the Principal Plane for nonsphericalparticles. **IV Reunión Española de Ciencia y Tecnología del Aerosol** – RECTA 2010, p. C141-C147, 2010.

WANG, Q., et al. Modeling investigation of light-absorbing aerosols in the Amazon Basin during the wet season. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 22, p. 14775-14794, 2016. https://doi.org/10.5194/acp-16-14775-2016

WILLEKE, K., BARON, P.A. **Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications**. John Wiley & Sons, 1993.