

PRECIPITAÇÃO E SUA RELAÇÃO À CONCENTRAÇÃO OU DISPERSÃO DE MATERIAL PARTICULADO INALÁVEL (MP₁₀) EM PRESIDENTE PRUDENTE (SP): ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ANOS DE 2019 E 2020

William Miyakava ¹

Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim ²

Introdução e justificativa

O processo de formação das cidades, aliado à urbanização acelerada, resulta na crescente concentração populacional em áreas urbanas (UN-HABITAT, 2022). Esse fenômeno exerce um impacto significativo sobre o clima local e regional, alterando o balanço energético e desencadeando uma série de processos que afetam tanto a qualidade do ar quanto a saúde dos habitantes (Monteiro, 1976; Amorim, 2020). As transformações no ambiente natural, provocadas por esse contexto, são intrinsecamente relacionadas às necessidades humanas, o que levam ao surgimento e agravamento de diversas doenças (Santos, 2006; Ribeiro; Vargas, 2015).

Nesse cenário, o clima urbano, escala de análise desse estudo, resulta da interação entre sociedade e natureza, sob uma perspectiva integradora e dinâmica (Monteiro, 1976). A relação entre o clima urbano e a saúde é estreita, pois fenômenos como o desconforto térmico, a redução da umidade atmosférica e a diminuição da ventilação urbana criam bolsões de concentração de poluentes atmosféricos, especialmente materiais particulados inaláveis (MP) (Mendes *et al.*, 2020). Esses poluentes, classificados como particulados inalável fino (MP_{2,5}) e particulados inalável (MP₁₀), representam um risco significativo à saúde, podendo penetrar até os alvéolos pulmonares e serem retidos pelo sistema respiratório (Brasil, 2024).

A origem desses particulados pode ser tanto natural quanto antropogênica, podendo ser transportados por longas distâncias, além de serem intensificados por processos e atividades humanas (Prospero *et al.*, 2005). As condições climatológicas têm uma relação direta ao acúmulo de poluentes na atmosfera, uma vez que a instabilidade atmosférica favorece a dispersão do mesmo e, conseqüentemente, melhoram a qualidade

¹Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Presidente Prudente – FCT UNESP, william.miyakava@unesp.br;

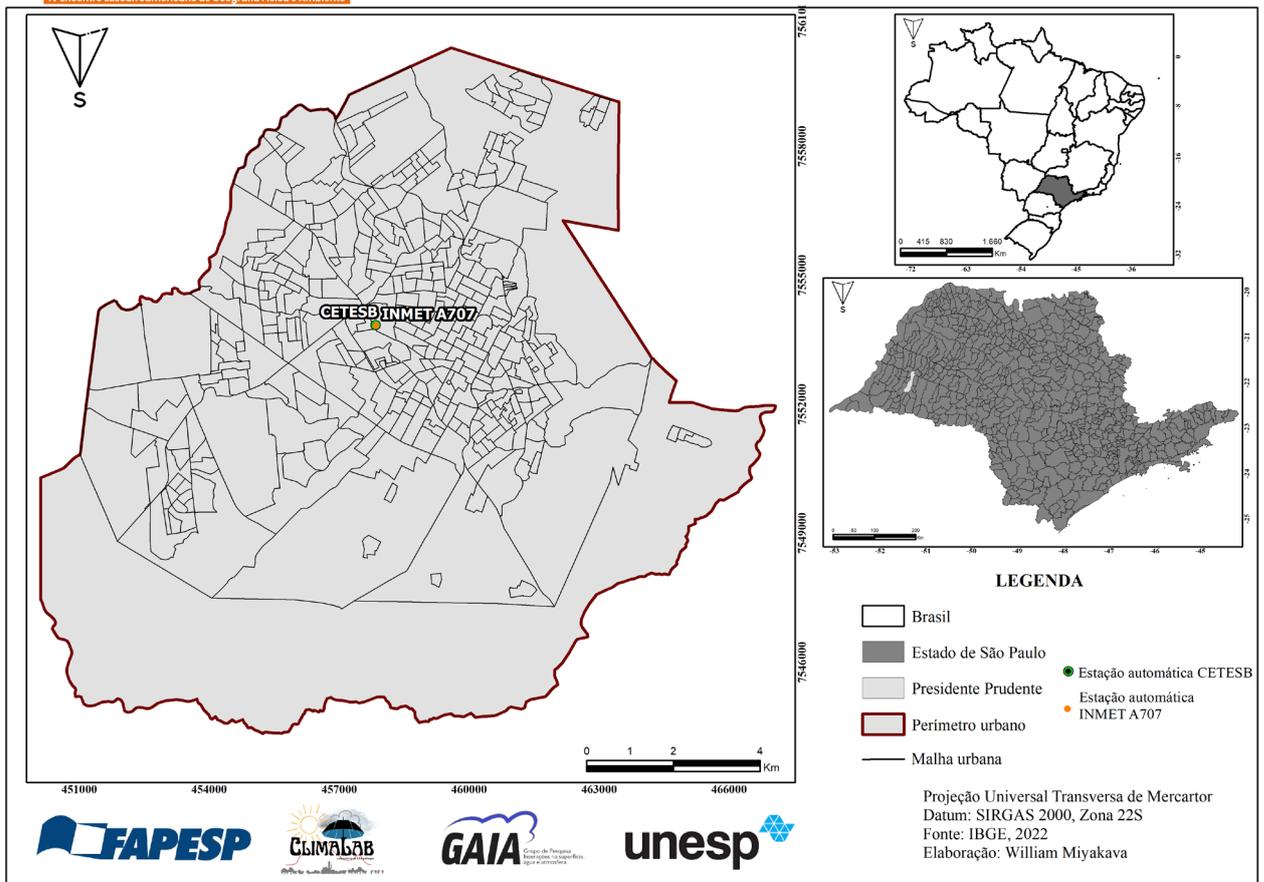
² Professora Livre Docente do Departamento de Geografia e Programa de Pós-Graduação em Geografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Presidente Prudente – FCT UNESP, margarete.amorim@unesp.br.

do ar (Derisio, 2017). Na mesma perspectiva, Xu *et al.* (2017) ressaltam que elementos climáticos influenciam diretamente a concentração ou dispersão de MP na atmosfera, sendo que, em situações de má qualidade do ar, a precipitação desempenha um papel crucial na remoção de poluentes atmosféricos.

Atualmente, as cidades constituem o principal espaço de habitação da humanidade. Em 2020, 56,17% da população mundial vivia em áreas urbanas (UN, 2018), enquanto no Brasil, 84,4% da população residia em áreas urbanas em 2010 (IBGE, 2010), com 71% desse total habitando cidades de pequeno e médio porte (IBGE, 2022). Desta forma, é fundamental realizar estudos que considerem essas cidades, visto que concentram a maioria da população nacional e mundial (Amorim, 2020). Apesar disso, pesquisas sobre o clima urbano relacionado à qualidade do ar e à saúde têm se ocorrido principalmente em grandes cidades e metrópoles, tanto no Brasil quanto internacionalmente (Andrade *et al.*, 2017).

Portanto, o objetivo deste trabalho é analisar a relação entre a sazonalidade da concentração de MP₁₀ e a precipitação em uma cidade de porte médio, Presidente Prudente (SP). Com um clima tropical continental e estação seca de inverno (AW) (Dubreuil *et al.*, 2018), a cidade (Figura 1) apresenta um padrão sazonal bem definido, com um período quente e chuvoso de outubro a março, e outro mais ameno e seco de abril a setembro (Amorim, 2020). A variabilidade climática, aliada às atividades antropogênicas, pode impactar significativamente os níveis de poluentes atmosféricos, tornando crucial a compreensão dessa relação para o desenvolvimento de estratégias de gestão da qualidade do ar, que considerem a qualidade de vida da população.

Figura 1: Localização dos sensores automáticos em Presidente Prudente (SP)



Fonte: IBGE, 2022. Elaboração: Miyakava, 2024.

Procedimentos metodológicos

Este trabalho fundamentou-se na proposta teórica e metodológica do sistema Clima Urbano (SCU), sob o subsistema Físico-Químico (canal da qualidade do ar) (Monteiro, 1976). O recorte temporal adotado abrangeu 12 meses, divididos entre períodos representativos de instabilidade atmosférica (janeiro, fevereiro e março) e de estabilidade atmosférica (junho, julho e agosto) nos anos de 2019 e 2020. Justifica-se a escolha do recorte temporal pela necessidade de validação dos resultados, que exige, no mínimo, dois eventos em estações climáticas opostas (Monteiro, 1971). A seleção dos anos supracitados também considera estudos que analisam a qualidade do ar em cidades durante o período de quarentena imposto pela pandemia de Covid-19 (Moreira *et al.*, 2021).

A aquisição dos dados seguiu o critério de representatividade, considerando apenas meses e dias com dados válidos que correspondessem a mais de dois terços do total (Chiquetto, 2008). Dessa forma, os dados de precipitação (mm) e MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) foram obtidos por meio das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET-A707) e da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB),

localizados dentro do campus da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCT UNESP (Figura 1).

Na sequência, os dados mencionados foram organizados no programa *Excel*, em formato tabular, considerando a concentração diária de 24 horas para cada mês analisado. Para o MP₁₀, foi calculado a média de 24 horas conforme o Índice de Qualidade do Ar (IQAr) (Brasil, 2024). Para a precipitação, considerou-se o acúmulo diário de 24 horas através da somatória total dos dados, com a devida conversão do fuso GMT para a hora local GMT-3.

Por fim, foram elaborados 12 gráficos combinados no programa *Excel* para ilustrar as características temporais das variáveis estudadas. Esses gráficos foram configurados com colunas representando a precipitação (mm) no eixo primário à esquerda e linhas com marcadores para a média diária de MP₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) no eixo secundário à direita. O MP₁₀ foi classificado conforme o padrão de qualidade do ar (Brasil, 2024), a partir dos dois níveis observados no recorte temporal: Nível 1 (N1 - Boa), para valores entre 0 e 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e Nível 2 (N2 - Moderada), para valores entre 46 e 95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para garantir a comparabilidade fidedigna dos dados, a escala da legenda foi padronizada com base nos valores mínimos e máximos estabelecidos no recorte temporal de cada variável.

Resultados e discussão

Em consonância à literatura nacional (Derisio, 2017) e internacional (Huneus *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2017), bem como estudos que abrangem o mesmo recorte territorial (Miyakava; Amorim; Silva, 2023), observou-se, em escala climática local (Sant’Anna Neto, 2013), que a dispersão de material particulado inalável (MP₁₀) foi intrinsecamente associada a períodos de instabilidade atmosférica. Por outro lado, a presença de sistemas atmosféricos estáveis inibiu o transporte de MP₁₀, resultando em maiores concentrações diárias.

No recorte temporal delimitado, constatou-se a ocorrência de precipitação em todos os meses analisados (Prancha 1), com maior frequência nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2019 e 2020. Durante os meses caracterizados por sistemas atmosféricos estáveis (junho, julho e agosto) em Presidente Prudente, a precipitação foi observada de maneira isolada.

De forma geral, verificou-se que a presença de precipitação, mesmo com pouco volume, contribuiu para a melhoria instantânea na qualidade do ar. A relação inversa entre a precipitação e a concentração de MP₁₀ foi evidente, com destaque para os dias 5 e 24

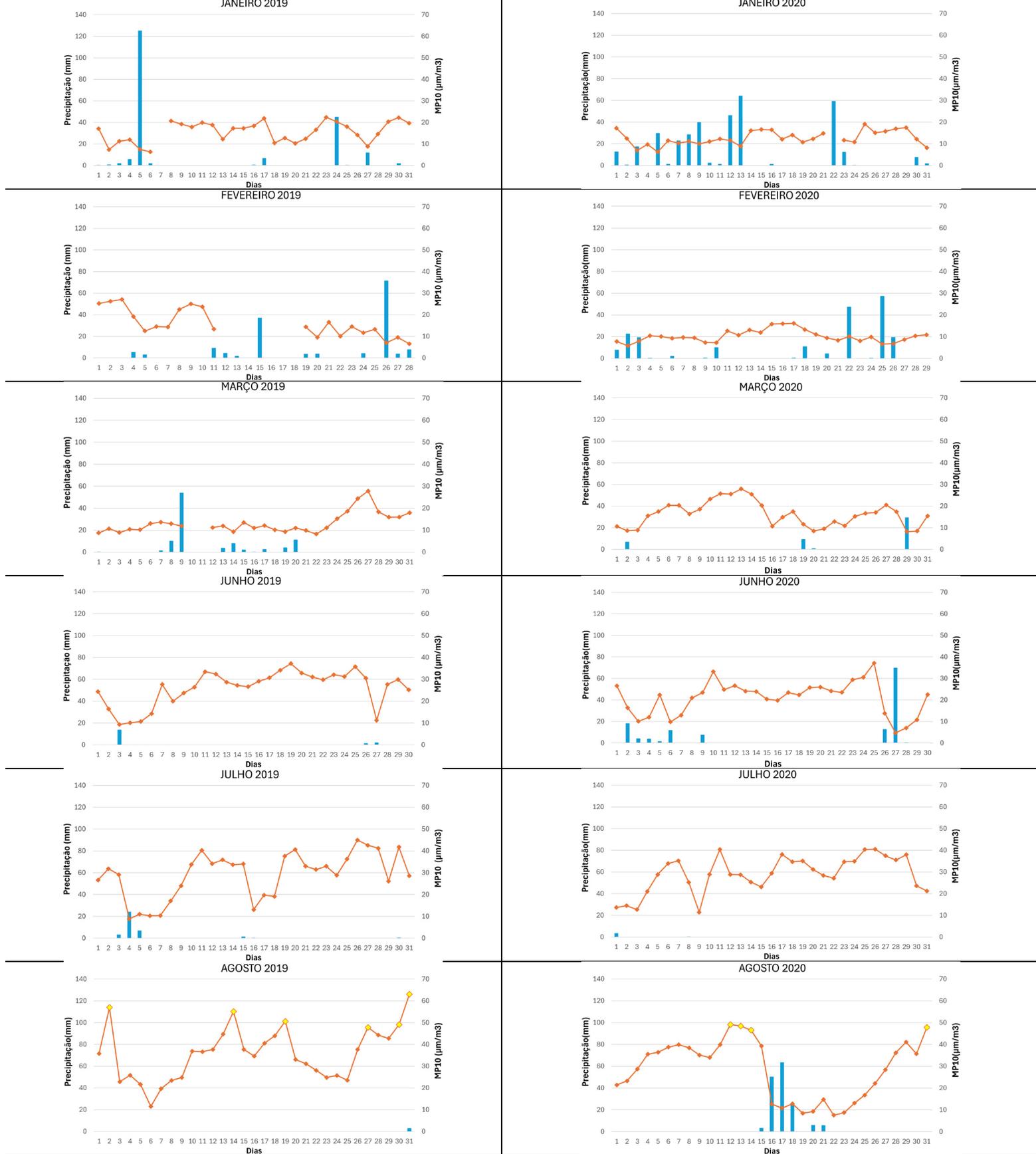
de janeiro de 2019; 26 de fevereiro de 2019; 4 de julho de 2019; 3, 5 e 13 de janeiro de 2020; 29 de março de 2020; 27 de junho de 2020; e 16, 17 e 18 de agosto de 2020 (Prancha 1).

Em contrapartida, nos dias sem precipitação, observou-se uma tendência de manutenção ou elevação contínua da concentração de MP_{10} , coincidindo com a ultrapassagem do nível 1 de qualidade do ar diário. Essa situação foi registrada nos meses de agosto de 2019, com 6 ultrapassagens, correspondendo a 19% do total mensal; e em agosto de 2020, com 4 ultrapassagens, representando 13% do total mensal, referente ao nível 2.

Além disso, nota-se uma semelhança no comprometimento da qualidade do ar em Presidente Prudente devido ao aumento da concentração de MP_{10} durante um evento de queimada na Amazônia, ocorrido entre os dias 17 e 19 de agosto de 2019. Esse evento resultou na deterioração da qualidade do ar e em um céu escurecido às 15h na cidade de São Paulo (SP) (Lemes et al., 2020). Os autores associam o transporte de MP para o Sudeste do Estado de São Paulo, passando pelo Oeste Paulista, devido à atuação de um sistema frontal e de um anticlone pós-frontal na retaguarda da frente fria, agravado pela inversão térmica que se concentrou nos níveis baixos da atmosfera.

Por fim, de acordo com os resultados de Moreira et al. (2021), os poluentes menos influenciados por emissões automotivas, como $MP_{2,5}$ e MP_{10} , apresentaram baixa variação durante o período de quarentena decorrente da pandemia de Covid-19, entre 22 de março de 2020 e 16 de agosto de 2021 no Estado de São Paulo, conforme o Decreto Nº 65.897, de 30 de julho de 2021 (São Paulo, 2021). Em comparação com o período correspondente anterior (junho, julho e agosto de 2019), os níveis de MP_{10} foram inferiores durante o inverno de 2020, indicando que as medidas restritivas, aliadas às condições climáticas, contribuíram para a redução da concentração diária de MP_{10} . No entanto, essa redução não foi suficiente para evitar dias com classificação moderada de qualidade do ar.

Prancha 1: Concentração diária (24h) de MP₁₀ e precipitação em meses chuvosos e secos em Presidente Prudente (SP)



Legenda: ■ PRECIPITAÇÃO —◆— MP10-N1 —◇— MP10-N2 — — AUSÊNCIA DE DADO



Fonte: CETESB; INMET, 2024. Elaboração: Os autores, 2024.

Considerações finais

Os resultados desta pesquisa demonstram que a dinâmica atmosférica exerce papel fundamental na concentração e dispersão de material particulado inalável, especificamente o MP₁₀ em Presidente Prudente. A ocorrência de precipitação, mesmo com baixo volume, mostrou-se eficaz na redução dos níveis de MP₁₀, evidenciando a importância dos sistemas atmosféricos instáveis na dispersão de poluentes atmosféricos.

Adicionalmente, os dados corroboram às tendências observadas em outros estudos, indicando que, embora as medidas restritivas e as condições climáticas favoráveis durante a pandemia de Covid-19 tenham contribuído parcialmente para a redução da concentração de MP₁₀, essa diminuição não foi suficiente para garantir uma qualidade do ar ideal em todos os períodos analisados.

A comparação dos resultados obtidos com os padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) ressalta a necessidade de implementar medidas mais eficazes para assegurar a saúde da população. Dada a importância do tema para a saúde pública, futuras pesquisas devem investigar com maior profundidade e detalhamento a complexa interação entre o clima urbano, a poluição atmosférica e a saúde, especialmente em cidades de pequeno e médio porte. Esses estudos devem buscar promover a qualidade de vida da população em níveis local e regional, objetivo que será abordado na dissertação do autor.

Palavras-chave: Clima Urbano; Qualidade do ar; Material particulado inalável; Precipitação.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro concedido por meio do processo nº2023/09950-3. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade dos autores e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

Referências

AMORIM, M. C. C. T. **Ilhas de calor em cidades tropicais de médio e pequeno porte: teoria e prática**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2020. 161p.

ANDRADE, M.F.A *et al.* Air quality in megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, v.159, p.66-82, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.051>. Acesso em: 08 jun. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente -CONAMA. **Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, p.1-5, 2024. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=827. Acesso em: 20 jul. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade do Ar**. São Paulo: CETESB, 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

CHIQUETTO, J. B. **Padrões atmosféricos associados a concentrações de ozônio troposférico na região metropolitana de São Paulo**. [dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

DERISIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 5.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 232p.

DUBREUIL, V. et al. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins**, n. 37, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confins.15738>. Acesso em: 20 ago. 2022.

HUNNEUS, N. *et al.* El aire que respiramos: pasado, presente y futuro – Contaminación atmosférica por MP_{2,5} en el centro y sur de Chile. **Centro de ciência del Clima y la Resiliencia (CR)2**, 102p., 2020. Disponível em: <https://www.cr2.cl/contaminacion/>. Acesso em: 04 jun. 2024.

IBGE -Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados>. Acesso em: 02 mar. 2022.

IBGE -Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 27 mar. 2024.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Meteorológicos**. Brasília: INMET, 2024. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A707>. Acesso em: 15 ago. 2024.

LEMES, M. C. R. *et al.* 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. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p983-993>. Acesso em: 21 ago. 2024.

MENDES, F. H. *et al.* Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile. **Revista de Geografía Norte Grande**, Santiago, n. 77, 2020, p. 191-210. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-3402202000030019>. Acesso em: 20 abr. 2023.

MIYAKAVA, W.; AMORIM, M. C. C. T.; SILVA, G. H. P. Elementos climáticos e sua relação com a concentração ou dispersão de Material Particulado Inalável (MP10) em Presidente Prudente (SP). In: X Simpósio Internacional de Climatologia, João Pessoa, 2023. **ANAIS [...]**. João Pessoa. Associação Brasileira de Meteorologia, 2023, p.835-840. Disponível em: https://e3sys.com.br/sic2023.com.br/files/ANAIS_SIC_FINAL.pdf. Acesso em: 10 dez. 2023.

MONTEIRO, C. A. de F. **Análise rítmica em climatologia**. Climatologia. São Paulo: USP/IGEOG, n. 1, 1971.

MONTEIRO, C. A. de F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: IGEOG/USP, 1976. 181p. (Série Teses e Monografias, nº 25).

MOREIRA, G. A. *et al.* COVID-19 outbreak and air quality: analyzing the influence of physical distancing and the resumption of activities in São Paulo municipality. **Urban Climate**, v.37, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100813>. Acesso em: 22 ago. 2024.

PROSPERO, J. M. *et al.* Interhemispheric transport of viable fungi and bacteria from Africa to the Caribbean with soil dust. **Aerobiologia**, v. 20, n. 4, p. 1-19, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10453-004-5872-7>. Acesso em: 20 jun. 2023.

RIBEIRO, H.; VARGAS, H. C. Urbanização, globalização e saúde. **Revista USP**, [S. l.], n. 107, p. 13-26, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i107p13-26>. p. 13-26. Acesso em: 14 dez. 2022.

SANT'ANNA NETO, J. L. Escalas geográficas do clima: mudança, variabilidade e ritmo. In: AMORIM, M. C. C. T.; SANT'ANNA NETO, J. L.; MONTEIRO, A. **Climatologia urbana e regional: questões teóricas e estudos de caso**. Expressões, São Paulo, 2013, p. 75 – 91.

SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 4. ed. São Paulo: Hucitec, 2006.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto Nº65.897, DE 30 DE JULHO DE 2021**. São Paulo: Diário Oficial do Estado de São Paulo, 2021. Disponível em: <http://dobuscadireta.imprensaoficial.com.br/default.aspx?DataPublicacao=20210731&Caderno=DOE-I&NumeroPagina=1>. Acesso em: 22 ago. 2024.

UN – United Nations. **World urbanization prospects 2018**. Washington, D.C., 2018. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Download/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

UN-HABITAT – United Nations Human Settlements Programme. **World Cities Report 2022: Envisaging the future of cities**. 387p., 2022. Disponível em: <https://unhabitat.org/wcr/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

XU, J. *et al.* Observation of the wet scavenge effect of rainfall on PM_{2.5} in Shanghai. **Acta Scientiae Circumstantiae**, v. 37, n. 9, p. 3271–3279, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325581755_Observation_of_the_wet_scavenge_effect_of_rainfall_on_PM25_in_Shanghai. Acesso em: 09 mar. 2023.