



Dinâmica Espaço-Temporal do $PM_{2,5}$ no Estado de Santa Catarina (2019–2025)

Luigi Bertinatto Mendes Campi | luigi.bm08@aluno.ifsc.edu.br¹

Bruno Esteves dos Santos | bruno.e03@aluno.ifsc.edu.br²

José Flávio Retkwa | jose.fr1980@aluno.ifsc.edu.br³

Cassio Aurelio Suski | cassio.suski@ifsc.edu.br⁴

André Luiz dos Reis | andreluiz.reis4@gmail.com⁵

Débora Souza Alvim | Debora.alvim@eel.usp.br⁶

Edital de fomento do trabalho 05/2024/PESQUISA/ITJ

Trabalho de Pesquisa

DT 2 - Meio Ambiente, Agroindústrias, Territórios e Sustentabilidade Socioambiental

Resumo:

O material particulado fino ($PM_{2,5}$) é um dos principais poluentes atmosféricos, associado a impactos significativos à saúde e ao meio ambiente, devido à sua capacidade de permanecer suspenso no ar e atingir as vias respiratórias. Em Santa Catarina, sua presença resulta da combinação entre emissões locais, como tráfego, atividades industriais e portuárias, e contribuições externas, especialmente de queimadas em outras regiões do Brasil. Este estudo tem como objetivo avaliar a variabilidade espacial e temporal das concentrações de $PM_{2,5}$ entre 2019 e 2025, identificando padrões sazonais e a influência do transporte atmosférico. A metodologia consistiu na obtenção e análise espacial de dados do modelo de reanálise MERRA-2, abrangendo o período de 2019 a 2025. A partir desses dados, foram confeccionados mapas sazonais que permitiram avaliar a distribuição das concentrações de $PM_{2,5}$ ao longo do território catarinense, considerando as particularidades meteorológicas de cada estação do ano. Os resultados mostram variações interanuais sem tendência contínua, porém com comportamento sazonal bem definido, com maiores níveis entre agosto e novembro e menores no verão, época que coincide com as estações de seca e picos de queimadas. Os anos de 2020 e 2024 apresentaram concentrações mais elevadas, enquanto 2021, 2022 e 2025 registraram valores mais moderados. Tais resultados evidenciam a importância do acompanhamento da qualidade do ar e da compreensão das diferentes fontes de emissão, especialmente diante da intensificação de eventos climáticos extremos.

Palavras-chave: $PM_{2,5}$; qualidade do ar; poluição atmosférica; variabilidade sazonal; queimadas.

¹ Estudante do curso de Engenharia Elétrica do IFSC - Câmpus Itajaí, luigi.bm08@aluno.ifsc.edu.br

² Estudante do curso de Engenharia Elétrica do IFSC - Câmpus Itajaí, bruno.e03@aluno.ifsc.edu.br

³ Estudante do curso de Engenharia Elétrica do IFSC - Câmpus Itajaí, jose.fr1980@aluno.ifsc.edu.br

⁴ Servidor Professor EBTT IFSC - Câmpus Itajaí/Mecânica, cassio.suski@ifsc.edu.br

⁵ Servidor Professor da UFMS - Câmpus Campo Grande, andreluiz.reis4@gmail.com

⁶ Servidor Professor da Universidade de São Paulo - Câmpus Lorena, Debora.alvim@eel.usp.br



Introdução

A poluição atmosférica por material particulado fino ($PM_{2,5}$) representa um importante problema ambiental e de saúde pública, devido à sua capacidade de penetrar profundamente no sistema respiratório, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS). Em Santa Catarina, a qualidade do ar é influenciada tanto por fontes locais — como tráfego veicular, atividades industriais e operações portuárias — quanto por fontes externas, como a fumaça proveniente de queimadas em outras regiões do Brasil (Hoinaski et al., 2023; Seinfeld; Pandis, 2016).

Diante disso, torna-se necessário compreender a dinâmica e as origens do $PM_{2,5}$ na região, a fim de contribuir para o monitoramento ambiental e a mitigação de seus impactos. Este estudo tem como objetivo analisar a variabilidade das concentrações de $PM_{2,5}$, identificando possíveis fontes e influências, tanto locais quanto de transporte atmosférico de longa distância, tendo em vista que o contínuo avanço econômico e industrial tende a impulsionar a liberação de poluentes, compreender as características e a dinâmica espaço-temporal da poluição atmosférica assume um caráter de extrema urgência.

Além disso, o estudo busca integrar ensino, pesquisa e extensão, ao promover a produção e a aplicação do conhecimento científico, contribuindo para a formação acadêmica e para a conscientização da sociedade sobre a qualidade do ar.

Fundamentação teórica

O material particulado fino ($PM_{2,5}$) é um dos poluentes atmosféricos mais críticos para a saúde pública e o clima. Por serem extremamente pequenas, essas partículas conseguem penetrar profundamente nos pulmões e atingir a corrente sanguínea, o que justifica as rigorosas diretrizes de segurança estipuladas pela Organização Mundial de Saúde (WHO, 2021). No entanto, o estudo do $PM_{2,5}$ é complexo, pois sua concentração em uma região não é definida apenas por fontes locais (como veículos e indústrias), mas

possui um forte componente de transporte atmosférico de longa distância (Seinfeld; Pandis, 2016), envolvendo processos de formação, transformação química e deposição atmosférica (Lazaridis, 2011).

No contexto de Santa Catarina, a qualidade do ar é diretamente impactada pela dinâmica meteorológica de todo o continente. Durante a estação seca, que compreende o final do inverno e a primavera, ventos conhecidos como Jatós em Baixos Níveis transportam a fumaça das grandes queimadas do Brasil central, da Amazônia e de países vizinhos para o Sul do país. Isso gera um gradiente espacial claro no estado: o Oeste e o Planalto são os primeiros a receber e reter essa carga de poluição, enquanto o Litoral consegue dispersar os poluentes com mais facilidade graças à brisa marítima. Esse cenário só é revertido no verão e no outono, quando chuvas mais frequentes realizam uma "limpeza" na atmosfera (Moore, 2020).

Houve picos de poluição registrados durante as secas e os incêndios recordes de 2020 e 2024, períodos em que o estado inteiro respirou um ar com níveis de toxicidade muito acima dos limites da OMS, que estabelece $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para média anual e $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para média de 24 horas, não configurando ultrapassagem dos padrões de segurança. Dessa forma, os resultados fornecem o embasamento científico necessário para a formulação de políticas públicas de saúde e para a criação de sistemas de alerta precoce, visando proteger a comunidade das crescentes ameaças climáticas e ambientais.

Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos foram divididos em duas etapas: coleta de dados satélite e geração de mapas e análise das relações entre queimadas, poluentes e variáveis meteorológicas.

- Coleta de dados via satélite: Os dados foram obtidos dos satélites MODIS e MERRA-2 Reanalysis, cobrindo o período de 2019 a 2025, com o objetivo de analisar variações temporais nas concentrações desses poluentes.

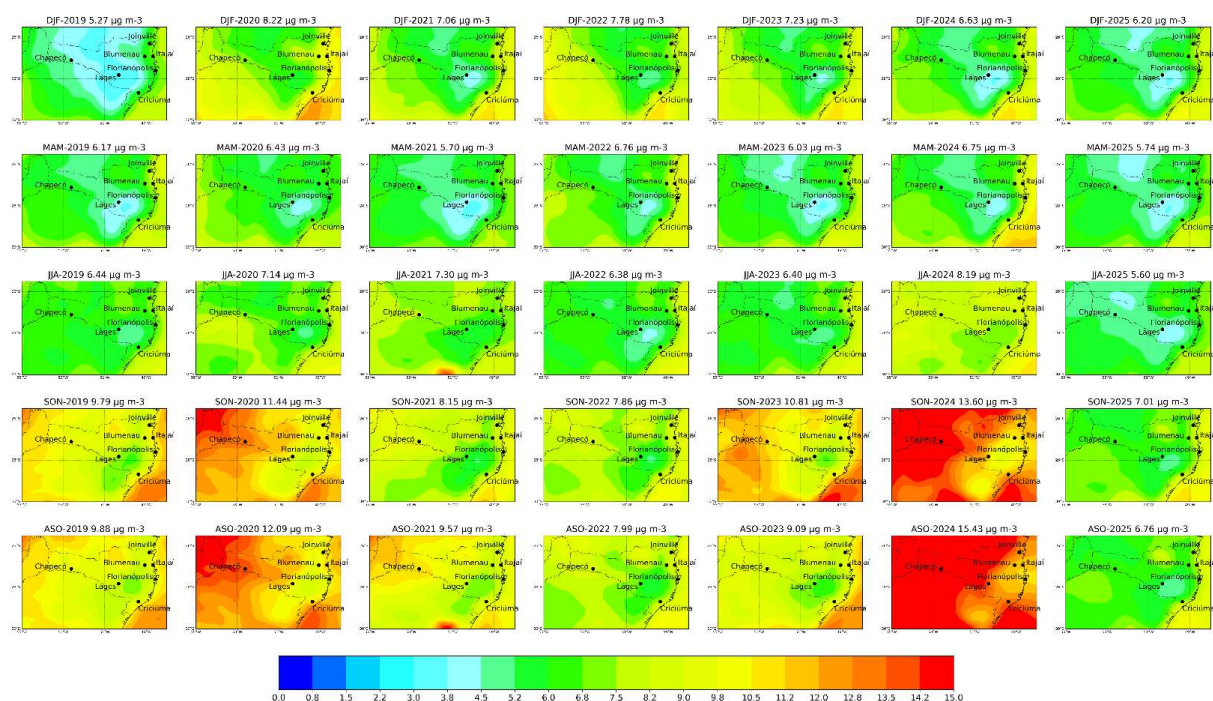


- Geração de mapas: Com os dados em formato NetCDF, foram utilizados scripts em Python (utilizando as bibliotecas NetCDF4, Xarray, Numpy, Pandas*, Matplotlib**, Pyplot**, Scipy** e Cfgrib***) para processar e mapear a distribuição espacial dos poluentes em Santa Catarina.

Resultados e discussões

As Figuras 1 e 2 indicam que, entre 2019 e 2025, as concentrações de material particulado fino ($PM_{2,5}$) em Santa Catarina apresentaram variações ao longo do período, iniciando em 2019 com níveis moderados e aumento mais evidente nos trimestres SON e ASO, sugerindo possível influência de queimadas; em 2020, observa-se um aumento expressivo nas concentrações, especialmente nos trimestres ASO e SON, que registram os maiores valores daquele ano, comportamento consistente com a ocorrência de queimadas intensas na Amazônia e no Pantanal, cuja fumaça foi transportada para a região Sul, impactando principalmente o oeste catarinense. Em 2021, verifica-se uma redução em relação a 2020, com valores mais homogêneos entre os trimestres e menor variabilidade espacial, caracterizando um período de relativa estabilidade. Em 2022, os níveis permanecem semelhantes aos de 2021, com leve aumento em alguns trimestres, porém sem variações sazonais marcantes, indicando condições atmosféricas mais equilibradas ao longo do ano. Já em 2023, há um novo aumento moderado das concentrações, com destaque para os trimestres SON e ASO, onde se observam valores mais elevados em comparação aos anos imediatamente anteriores. Em 2024, há um aumento significativo nas concentrações de $PM_{2,5}$, sendo este o ano com os maiores valores de todo o período analisado, principalmente nos trimestres ASO e SON, comportamento associado à atuação do El Niño, que favoreceu condições de seca e intensificou as queimadas, contribuindo para o transporte de poluentes até Santa Catarina. Por fim, em 2025, observa-se uma redução expressiva em relação a 2024, seguida de relativa estabilidade ao longo dos trimestres analisados, possivelmente relacionada à diminuição das queimadas e à melhora das condições atmosféricas em comparação ao ano anterior.

Figura 1 - Mapas de concentração de $PM_{2,5}$ no estado de Santa Catarina

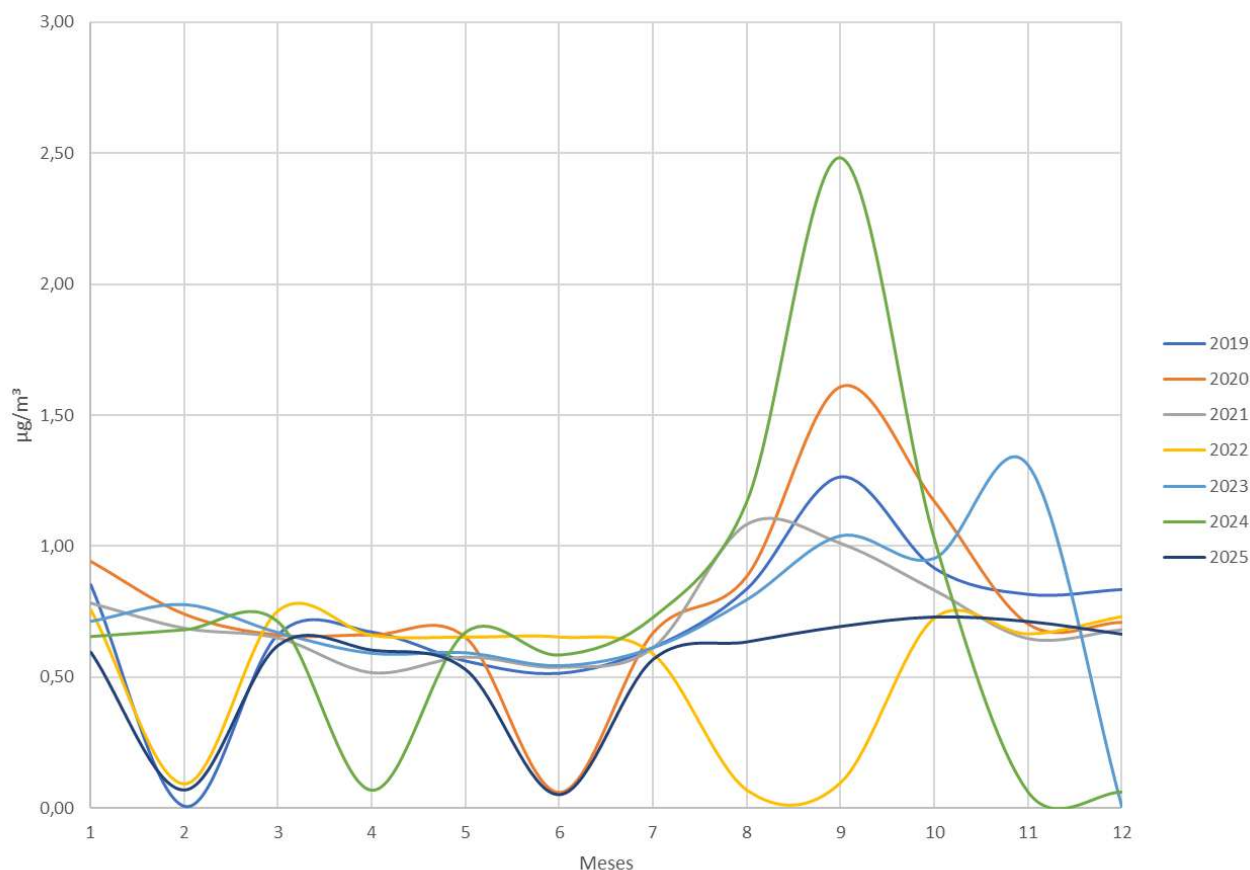


Fonte: Autores, 2026

A análise temporal das concentrações de Material Particulado fino ($PM_{2,5}$) entre 2019 e 2025 revela um cenário de qualidade do ar positivo e seguro, caracterizado por níveis absolutos substancialmente inferiores aos limites legais. Mesmo durante o pico atípico registrado em setembro de 2024 (aproximadamente $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) como demonstrado na Figura 2, as concentrações mantiveram-se de forma consistente abaixo do rigoroso teto estabelecido pela tabela de padrões de qualidade do ar do CONAMA nº 506 (BRASIL, 2024), representando apenas metade do Padrão Final (PF) estipulado para a

média anual ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e uma fração irrisória do limite de 24 horas ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 2 - Evolução temporal da concentração de $\text{PM}_{2,5}$ no estado de Santa Catarina



Fonte: Autores, 2026

Considerações finais

As análises realizadas evidenciam que a qualidade do ar em Santa Catarina, no período de 2019 a 2025, é fortemente influenciada por processos de transporte atmosférico de longa distância, além das fontes locais. Observou-se um padrão sazonal bem definido, com maiores concentrações de $\text{PM}_{2,5}$ entre o final do inverno e a primavera, associado à chegada de poluentes provenientes de queimadas na Amazônia e no Centro-Oeste. Regionalmente, o Oeste e o Planalto mostraram-se mais suscetíveis ao acúmulo desses poluentes, enquanto o Litoral apresentou melhores condições de dispersão devido à influência dos ventos oceânicos.



Adicionalmente, os resultados destacam a vulnerabilidade do estado a eventos climáticos extremos, como os registrados em 2020 e 2024. Apesar do aumento nas concentrações de $PM_{2,5}$ nesses períodos, os valores permaneceram abaixo dos limites recomendados pela OMS, não configurando ultrapassagem dos padrões de qualidade do ar. Ainda assim, a influência de fontes externas reforça a necessidade de monitoramento contínuo e de políticas integradas de controle da poluição atmosférica em escala regional e nacional.

Referência ao fomento recebido

Este projeto foi financiado pelo Edital de Pesquisa 05/2024 do IFSC Câmpus Itajaí e pelo Edital CNPq 22_2024.

Referências

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 506, de 05 de julho de 2024. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2024.

HOINASKI, Leonardo et al. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS EMISSÕES VEICULARES, QUEIMADAS, INDUSTRIAIS E NATURAIS NA QUALIDADE DO AR EM SANTA CATARINA - ANO BASE 2021. [S.l.: s.n.], 2023. Acesso em: 30 abr. 2026.

LAZARIDIS, Mihalis. First principles of meteorology and air pollution. Dordrecht: Springer, 2011.

MOORE, Julia Placido. Vulnerabilidade na saúde devido às emissões atmosféricas: Um estudo de caso em Santa Catarina. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/213468>. Acesso em: 30 abr. 2026.

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

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021.