



Estudo da poluição atmosférica referente ao dióxido de enxofre (SO₂) na cidade de Capivari de Baixo - Santa Catarina

Vanessa Dafni Bard | vanessa.db@aluno.ifsc.edu.br¹

Cássio Aurélio Suski | cassio.suski@ifsc.edu.br²

Edson Luiz Brasil Filho | edson.lb@aluno.ifsc.edu.br³

João Pedro Kaveski Dacoreggio | joao.pkd16@aluno.ifsc.edu.br⁴

Bruno Esteves dos Santos | bruno.e03@aluno.ifsc.edu.br⁵

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

Edital nº 03/2025/PROPI – PIBITI

Trabalho de Pesquisa aplicada.

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

Resumo:

A queima de carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), em Capivari de Baixo (SC), é uma fonte crítica de dióxido de enxofre (SO₂), poluente associado à chuva ácida e impactos respiratórios. Este estudo teve como objetivo realizar uma análise temporal das concentrações de SO₂ na região para avaliar a eficácia de tecnologias de controle e a influência de fatores ambientais. A metodologia integrou a elaboração de um inventário de emissões (1997-2019), a coleta de dados terrestres do IMA/SC (2014-2024) e o processamento de dados de reanálise atmosférica do modelo MERRA-2 (1980-2024). Os resultados indicaram que as emissões industriais declinaram após 2007 devido à instalação de tecnologias como lavadores de gases, mantendo as concentrações locais (8 a 17 µg/m³) dentro dos padrões nacionais vigentes. Identificou-se também uma sazonalidade sistemática entre maio e setembro, atribuída ao transporte de fumaça de queimadas do norte do Brasil via corredores de vento. A validação estatística revelou que o modelo MERRA-2 subestima as concentrações locais em dez vezes, indicando a necessidade de modelos de maior resolução espacial. Conclui-se que os níveis de SO₂ na cidade resultam da interação entre fontes locais e remotas, reforçando a importância do monitoramento contínuo e da transição para matrizes energéticas sustentáveis.

Palavras-chave: dióxido de enxofre; termelétrica; chuva ácida; reanálise; usina Jorge Lacerda

¹ Estudante do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Itajaí

² Servidor / Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina campus Itajaí.

³ Estudante do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Itajaí

⁴ Estudante do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Itajaí

⁵ Estudante do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Itajaí

⁶ Servidora / Química da Universidade de São Paulo.

Introdução

A utilização de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, permanece como um pilar da geração de energia, mas impõe riscos críticos à qualidade do ar devido à liberação de dióxido de enxofre (SO_2) (Smith *et al.*, 2011).

Quando emitido na atmosfera, o SO_2 reage com o radical hidroxila e a umidade, transformando-se em ácido sulfúrico, fenômeno conhecido como chuva ácida. Esse processo resulta na acidificação de solos e corpos hídricos, degradando a biodiversidade e acelerando a corrosão de materiais (Aguiar, 1999). Além dos danos ecossistêmicos, a inalação do SO_2 causa irritação imediata nas vias respiratórias. A exposição prolongada agrava patologias respiratórias e cardiovasculares, afetando sobretudo crianças e idosos (Khalaf *et al.*, 2024; CETESB, 2021).

O Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), em operação desde 1960 em Capivari de Baixo (SC), é o maior da América Latina e integra um setor histórico que, após o auge produtivo na década de 1970, enfrentou severa retração de 62% na década de 1990 devido a crises estruturais (Lins, 2021; Goethe, 1989). Esse cenário forçou a busca por conformidade ambiental, justificando a análise da eficácia de suas modernizações frente à Resolução CONAMA nº 506/2024 (Brasil, 2024). O objetivo deste estudo foi realizar uma análise temporal das concentrações de SO_2 , utilizando múltiplas fontes de dados para compreender os padrões de poluição e a influência de fatores meteorológicos e sazonais na região de Capivari de Baixo - Santa Catarina.

Fundamentação teórica

Impactos à Saúde e Meio Ambiente

A exposição ao dióxido de enxofre (SO_2) está intrinsecamente ligada a patologias do sistema respiratório, atuando como um irritante potente que provoca broncoconstrição imediata ao penetrar nas vias aéreas superiores. De acordo com os estudos de Khalaf *et al.* (2022) e dados da CETESB (2021), os sintomas clínicos comuns incluem tosse persistente, chiado no peito e o agravamento de quadros de asma e bronquite crônica.

Em níveis celulares, a inalação prolongada de SO_2 pode induzir estresse oxidativo e inflamação sistêmica, elevando significativamente o risco de doenças cardiovasculares,

especialmente em grupos vulneráveis como crianças e idosos (Khalaf *et al.*, 2022). Além dos danos respiratórios e cardiovasculares, a mitigação do SO₂ no CTJL depende da eficácia de sistemas de dessulfurização e lavadores de gases. A escolha dessas tecnologias é definida pelo teor de enxofre do minério e por critérios econômicos, sendo essencial para reduzir as emissões nas chaminés (Pelissari, 2021).

Procedimentos metodológicos

Área de Estudo

O estudo foca em Capivari de Baixo (28° 27' S; 48° 58' W), município de 53,22 km² com população de 23.975 habitantes (IBGE, 2022), sede do CTJL (740 MW).

Etapas de Coleta e Modelagem

Foram estruturados três eixos principais de coleta e análise de dados. O primeiro, consistiu na elaboração de um inventário de emissões (1997-2019), utilizando relatórios técnicos da Japan International Cooperation Agency (JICA) e da ENGIE Brasil Energia S.A. As medições desse inventário foram realizadas diretamente nos precipitadores eletrostáticos das chaminés das sete unidades geradoras do complexo.

O segundo, envolveu a coleta de dados de monitoramento terrestre do IMA/SC das estações de Capivari de Baixo, São Bernardo e Vila Moema. Esses sensores, situados a aproximadamente 1 metro do solo, forneceram médias mensais baseadas em medições horárias, seguindo a regra de validação de pelo menos 70% de dados válidos por mês.

O terceiro eixo utilizou a reanálise MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, versão 2) da NASA, que integra o modelo GEOS-5 com observações meteorológicas históricas globais. Foram processadas médias mensais e anuais de SO₂ desde 1980 até 2024, gerando mapas de concentração espacial por meio do software NCL (NCAR Command Language).

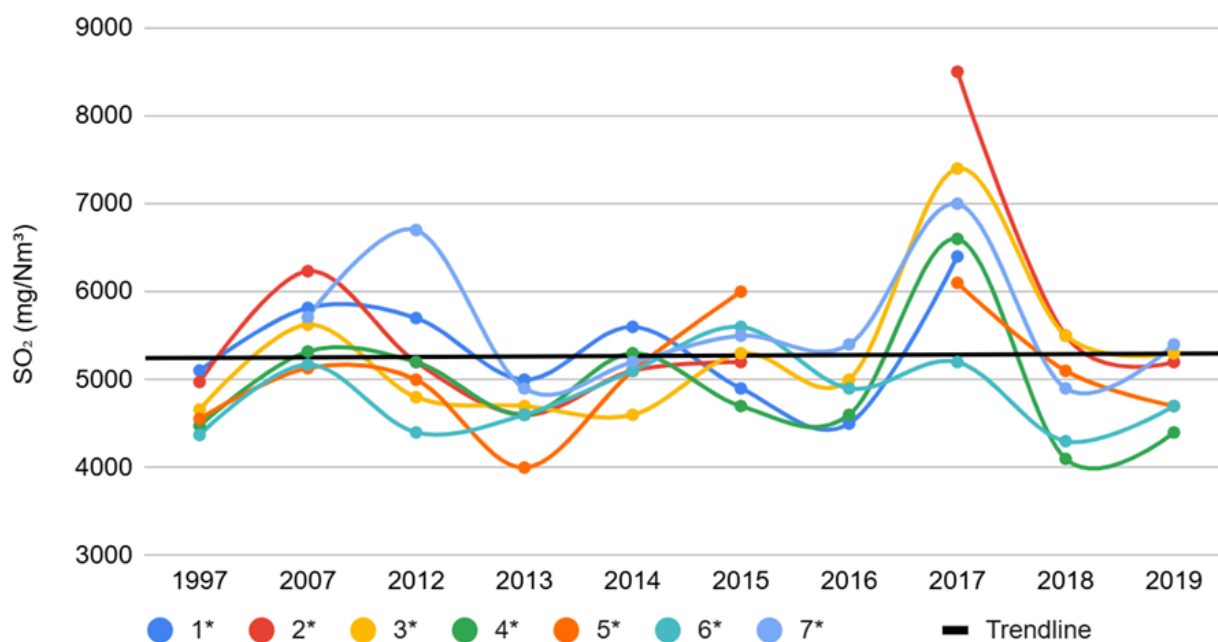
Por fim, realizou-se uma análise estatística comparativa entre os dados do MERRA-2 e das estações do IMA/SC, calculando métricas de correlação de Pearson (*r*),

erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2), sintetizados graficamente através de um Diagrama de Taylor.

Resultados e discussões

A análise das emissões históricas nas chaminés do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL) revelou uma trajetória de controle tecnológico, onde as emissões de SO_2 , que atingiram picos de 6.233 mg/Nm^3 entre 1997 e 2007, apresentaram uma tendência decrescente em 2019 (Figura 1), estabilizando-se entre 4.400 e 5.400 mg/Nm^3 devido a investimentos em eficiência de combustão e lavagem de gases.

Figura 1: Dados de 1997 a 2019 de análises bibliográficas.

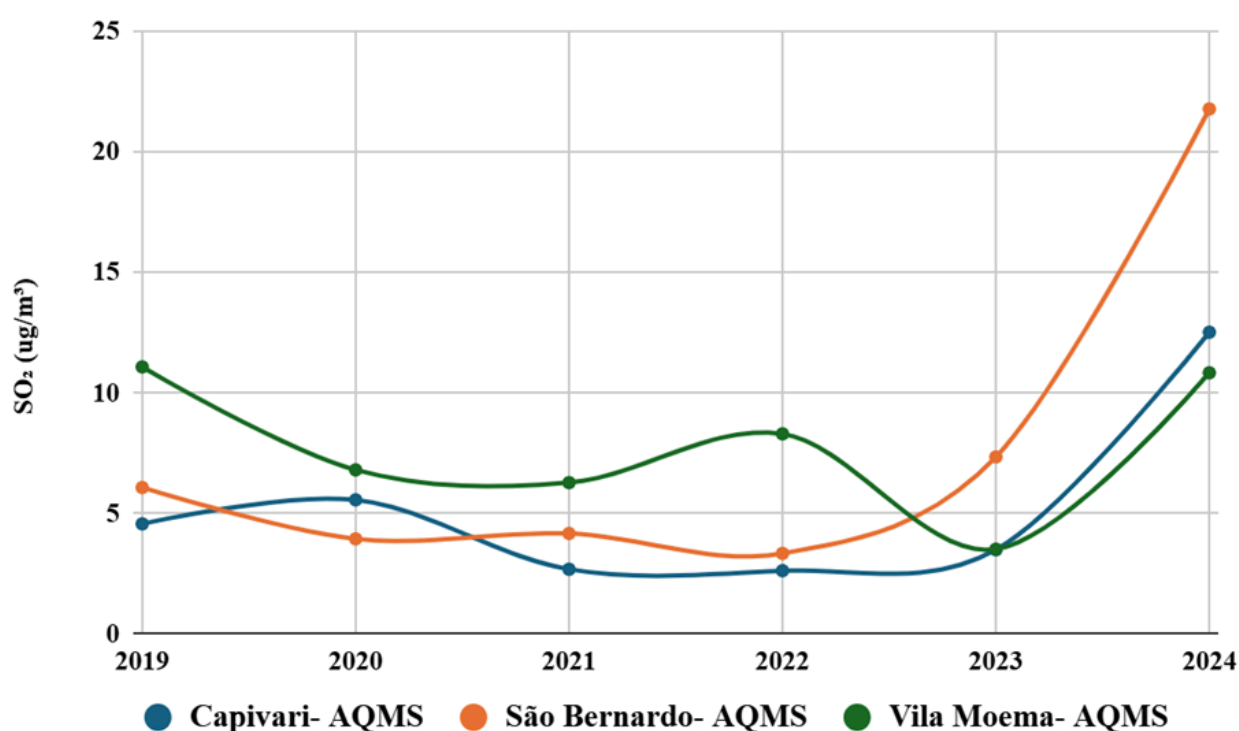


*As séries de dados representam as unidades geradoras do complexo termelétrico Jorge Lacerda.

Fonte: ENGIE, 2020.

Esse controle é validado pelos dados das estações do IMA/SC, que registraram concentrações médias entre 8 e 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no período de 2019 a 2024, (Figura 2), mantendo a qualidade do ar de Capivari de Baixo significativamente abaixo do limite legal de 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

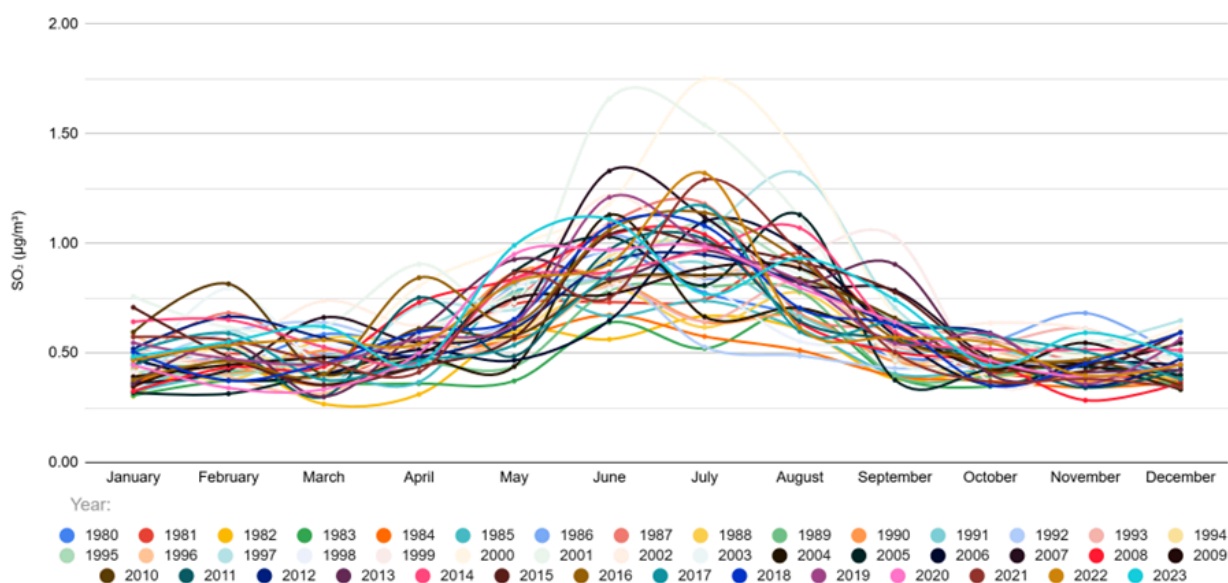
Figura 2: Concentrações de SO_2 nas estações de monitoramento de qualidade do ar.



Fonte: IMA, 2024.

Sazonalmente, embora as estações locais indiquem picos em julho, agosto e novembro, a reanálise MERRA-2 identificou um aumento sistemático entre maio e setembro (Figura 3).

Figura 3: Comparativo das concentrações mensais nos anos de 1980 a 2023, provenientes do MERRA-2



Fonte: Autores (2026).

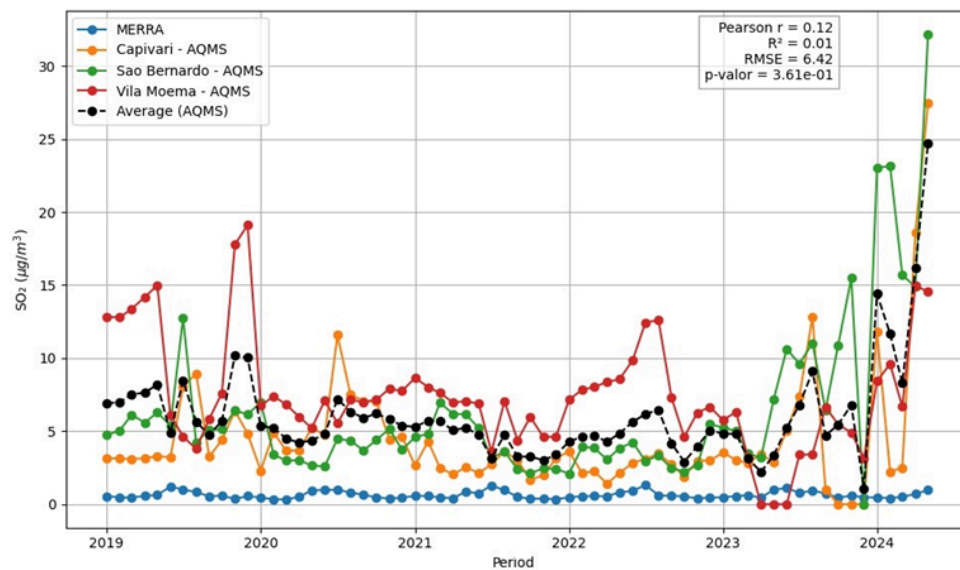
Esse fenômeno está associado ao transporte de poluentes vindos de queimadas no norte do Brasil, que são deslocados por corredores de vento até o sul do país. Historicamente, os modelos capturaram o impacto de decisões políticas e econômicas, como a queda acentuada de emissões em 1990 após o decreto do governo Collor, seguida por um novo aumento na década de 90 que resultou em episódios de chuva ácida com pH de 3,62 na região.

Contudo, a validação estatística demonstrou que o modelo global MERRA-2 subestima as concentrações reais em cerca de dez vezes e possui uma correlação muito baixa ($r = 0,12$) com os dados terrestres, conforme apresentado nas Figuras 4 e 5, o que reforça a necessidade de modelos de maior resolução espacial para a gestão urbana.

Os dados da Figura 4 demonstram uma discrepância crítica: enquanto as estações AQMS registram picos reais de até 30 µg/m³ em 2024, o modelo MERRA-2 permanece linear e próximo a zero. Isso é corroborado pelo Diagrama de Taylor (Figura 5), onde a

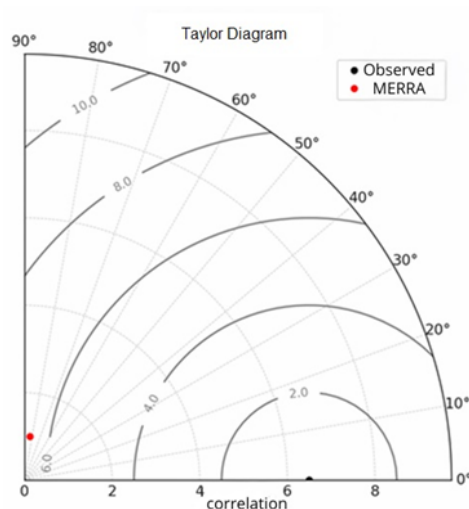
posição do ponto 'MERRA' (vermelho) está distante do 'Observed' (preto), indicando que o modelo global não possui resolução para captar a complexidade da camada limite urbana em Capivari de Baixo, apresentando um R^2 de apenas 0,01.

Figura 4: Análise estatística entre as concentrações das estações e do MERRA-2.



Fonte: Autores (2026).

Figura 5: Diagrama de Taylor para as estações AQMS e o MERRA-2.



Fonte: Autores (2026).

Considerações finais

O estudo comprovou que as modernizações tecnológicas no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL), como a implementação de lavadores de gases e precipitadores eletrostáticos, foram decisivas para a redução progressiva das emissões de SO_2 após 2010, revertendo os picos superiores a 6.000 mg/Nm^3 observados na década anterior. Atualmente, as concentrações médias em Capivari de Baixo (8 a $17 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) atendem plenamente aos padrões da Resolução CONAMA nº 506/2024 (Brasil, 2024).

A análise revelou, contudo, que a qualidade do ar local não depende apenas da usina, mas é significativamente impactada por fontes remotas. Identificou-se uma sazonalidade sistemática entre maio e setembro, período em que o transporte de fumaça de queimadas no norte do Brasil, deslocada por corredores de vento, eleva as concentrações de SO_2 na região Sul.

Quanto à ferramenta de análise, concluiu-se que o modelo global MERRA-2 apresenta limitações críticas para a gestão urbana local, subestimando as concentrações reais em dez vezes e apresentando uma correlação muito baixa ($r=0,12$) com os dados terrestres do IMA/SC. Reforçando a necessidade de utilizar modelos de maior resolução espacial para decisões de saúde pública. Por fim, a complexidade da poluição regional exige uma abordagem que combine o controle de fontes locais com a mitigação de impactos remotos, visando a transição para matrizes energéticas sustentáveis.

Referência ao fomento recebido

Este projeto foi apoiado financeiramente pelo Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) por meio de bolsa de iniciação científica e desenvolvimento tecnológico, sob o Projeto Número PIITJ4227-2025.



Referências

AGUIAR, João Batista Santafé. Chuva ácida agrava condições de vida em Tubarão. **AgirAzul**, ed. 7, 1999. Disponível em: <https://www.agirazul.com.br/Eds/ed7/tub.htm>. Acesso em: 9 jul 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024**. Estabelece padrões de qualidade do ar. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2024.

CETESB. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2020**. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2021.

GOETHE, C. A. Diagnóstico ambiental da região carbonífera catarinense. In: 2º Encontro Nacional de Estudos sobre o Meio Ambiente, 1989, Florianópolis/SC, **Anais...** vol. 3, Florianópolis: Ed. da UFSC, 1989, p. 62-96.

KHALAF, E. M. et al. Efeitos da inalação de dióxido de enxofre na saúde humana: uma revisão. **Reviews on Environmental Health**, v. 39, n. 2, 2022.

LINS, F. Indústria, poluição atmosférica e saúde pública. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 9, p. 141-170, 2021.

PELISSARI, Maria Rogieri. **Avaliação de reservatórios potenciais para armazenamento geológico de CO2 emitidos pelo Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, Santa Catarina**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

SMITH, S. J. et al. Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, p. 1101–1116, 2011.