

Análise sazonal da concentração de NO_2 em Cubatão/SP (2015-2025) frente aos padrões de qualidade do ar



Seasonal analysis of NO_2 concentration in Cubatão, SP (2015–2025) compared to air quality standards

Natasha Stefani dos Santos Farias 

Fatec Praia Grande
natasha.santos003@gmail.com

Aline Isabel Montanheri Oliveira 

Fatec Praia Grande
alinebell100@gmail.com

Denis Pimentel 

Fatec Praia Grande
dpimentel110@gmail.com

Izabel da Silva Andrade 

Fatec Praia Grande
izaabel94@hotmail.com

Revista Processando o Saber

eISSN 2179-5150 · Vol 18, n. 01, 2026
Multidisciplinar · DOI · Revisão por pares

Faculdade de Tecnologia Praia Grande – FATEC

Períodicidade: Anual
revista@fatecpg.edu.br

Recebido: Jan 2026

Aceito: Mar 2026

Publicado: Jun 2026

URL: <https://www.fatecpg.edu.br/revista/index.php/ps/article/view/447>

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20045213>



RESUMO

O presente trabalho avalia a variação das concentrações de dióxido de nitrogênio (NO_2) em Cubatão (SP) entre 2015 e 2025, utilizando dados das estações da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB): Centro, Vale do Mogi e Vila Parisi. As análises mostram que as médias anuais de NO_2 permaneceram sistematicamente acima dos limites recomendados pela OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e pela CETESB – MI2 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), com valores médios variando entre $30,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no Centro, $35,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no Vale do Mogi e $49,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em Vila Parisi ao longo do período. Durante a pandemia de COVID-19 (2020–2021), observou-se uma redução temporária das concentrações, atribuída à queda nas atividades industriais e no tráfego veicular; entretanto, os níveis permaneceram acima dos padrões de qualidade do ar e voltaram a aumentar no período pós-pandemia. Os resultados evidenciam um quadro persistente de poluição atmosférica por NO_2 no município, com implicações relevantes para a saúde pública e necessidade de políticas mais eficazes de controle de emissões e aprimoramento do monitoramento ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Poluição Atmosférica, dióxido de nitrogênio, monitoramento de qualidade do ar, poluição do ar urbana, Cubatão.

ABSTRACT

This study evaluates the variation in nitrogen dioxide (NO_2) concentrations in Cubatão (SP) between 2015 and 2025, using data from the Environmental Company of the State of São Paulo (CETESB) stations: Centro, Vale do Mogi, and Vila Parisi. The analyses show that the annual averages of NO_2 remained systematically above the limits recommended by the WHO ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and by CETESB – MI2 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), with average values varying between $30.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Centro, $35.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Vale do Mogi, and $49.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Vila Parisi throughout the period. During the COVID-19 pandemic (2020–2021), a temporary reduction in concentrations was observed, attributed to the drop-in industrial activities and vehicular traffic; However, levels remained above air quality standards and increased again in the post-pandemic period. The results highlight a persistent pattern of NO_2 air pollution in the municipality, with significant implications for public health and the need for more effective emission control policies and improved environmental monitoring.

KEY-WORDS: Atmospheric Pollution, Nitrogen dioxide, Air quality monitoring, Urban air pollution, Cubatão.

INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica constitui um dos principais desafios ambientais e de saúde pública da atualidade, com destaque para os poluentes gasosos e material particulado emitidos por fontes antrópicas e de processos naturais. Entre esses poluentes, o dióxido de nitrogênio (NO₂) assume papel central devido ao seu impacto direto na saúde humana, contribuindo para doenças respiratórias, cardiovasculares e redução da expectativa de vida (WHO, 2021). Segundo a OMS, exposições prolongadas a concentrações de NO₂ acima dos valores de referência estão associadas ao aumento de internações hospitalares por bronquite, asma e agravamento de condições pré-existentes (WHO, 2021).

No Brasil, a problemática da poluição atmosférica ganha relevância em municípios que apresentam forte presença industrial, tráfego intenso de veículos e condições meteorológicas que favorecem a dispersão ou acumulação de poluentes. O município de Cubatão, localizado na Baixada Santista, é reconhecido historicamente como um polo industrial estratégico, mas também como um dos principais casos de degradação ambiental associados à emissão de poluentes atmosféricos. Entre as décadas de 1980 e 1990, a cidade chegou a ser denominada “Vale da Morte”, em virtude dos altos níveis de poluição e seus impactos sobre a saúde da população e o meio ambiente (CETESB, 2023)

Desde então, avanços significativos ocorreram no controle de emissões, monitoramento ambiental e aplicação de políticas públicas. Entretanto, estudos recentes indicam que, embora os níveis de material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}) e dióxido de enxofre (SO₂) tenham apresentado quedas acentuadas, o NO₂ ainda representa um desafio, especialmente em áreas de tráfego intenso e proximidade com fontes industriais (CETESB, 2024).

A regulamentação da qualidade do ar no Brasil, atualmente, é estabelecida pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que definiu padrões nacionais progressivos para diversos poluentes, alinhando-se de forma gradual aos valores-guia recomendados pela OMS. Para o NO₂, a resolução adota metas intermediárias (MI1, MI2 e MI3), sendo que a Meta Intermediária 2 (MI2) estabelece o valor de 20 µg/m³ (média anual) como parâmetro de controle (CONAMA, 2018). A OMS, por sua vez, em sua revisão de 2021, recomenda o valor de 10 µg/m³ (média anual) como limite seguro para exposição de longo prazo (WHO, 2021). Assim, os estados brasileiros vêm adotando estratégias graduais de adequação, de modo a reduzir as concentrações até os valores de referência internacional (CETESB, 2025).

Cubatão apresenta características ímpares para o estudo da poluição atmosférica por NO₂. O município abriga indústrias de grande porte, como siderúrgicas, petroquímicas e

fábricas de fertilizantes, além de elevado fluxo de veículos leves e pesados devido à sua posição estratégica de ligação entre o planalto paulista e o Porto de Santos. Essas condições resultam em uma combinação de fontes fixas e móveis que contribuem para a emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x), dos quais o NO₂ é o mais monitorado por seus impactos ambientais e à saúde (Vergnhanini Filho, 2016).

A análise temporal dos dados de qualidade do ar também permite avaliar os efeitos de eventos excepcionais, como a pandemia da COVID-19, que levou à redução significativa das atividades industriais e do tráfego de veículos em 2020 e 2021.

Diversos estudos internacionais evidenciam quedas abruptas nas concentrações de NO₂ durante os períodos de restrição de mobilidade (Seguel *et al.*, 2022; Moreira *et al.*, 2021; Nakada & Urban, 2020). Na América Latina, pesquisas conduzidas em capitais como Bogotá, Santiago e São Paulo identificaram reduções significativas nas concentrações de NO₂ durante o período pandêmico. As medianas observadas por satélite diminuíram em aproximadamente 40%, 35% e 47%, respectivamente (Seguel *et al.*, 2022). Contudo, os efeitos foram temporários, e a retomada das atividades resultou em elevações nos anos seguintes.

Dessa forma, a presente pesquisa tem como objetivo analisar a variação da concentração de NO₂ no município de Cubatão/SP, comparando os períodos pré-pandemia (2015 a 2019), pandemia (2020 a 2021) e pós-pandemia (2022 a 2024). A investigação utiliza dados das estações de monitoramento da CETESB e emprega ferramentas estatísticas e gráficas para avaliar a evolução temporal do poluente. A comparação com os limites de referência da OMS e da CETESB (MI2) possibilita verificar a adequação da qualidade do ar frente às normativas ambientais e discutir os avanços e desafios para o controle da poluição no município.

Espera-se, com este estudo, contribuir para a compreensão dos impactos do NO₂ em Cubatão e subsidiar políticas públicas de gestão da qualidade do ar. Além disso, a análise comparativa entre os períodos pré, durante e pós-pandemia pode evidenciar o papel das fontes móveis e fixas de emissão no município, bem como reforçar a importância do monitoramento ambiental como ferramenta de gestão e prevenção de riscos à saúde da população.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O caso de Cubatão, constitui um dos exemplos mais emblemáticos dos impactos duradouros que um modelo de industrialização acelerada, concentrada e pouco regulamentada pode exercer sobre a saúde pública e o meio ambiente.

Desde a implantação de seu polo industrial, o município tornou-se um símbolo da poluição atmosférica no Brasil, resultado da intensa concentração de atividades siderúrgicas, petroquímicas e de fertilizantes, aliada a condições topográficas e meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes.

Já na década de 1980, estudos pioneiros sobre morbidade hospitalar revelavam as primeiras consequências desse processo: as doenças respiratórias ocupavam a segunda principal causa de internações, com a pneumonia respondendo por cerca de 20% dos casos. Crianças menores de cinco anos figuravam entre as mais afetadas, refletindo os efeitos da exposição crônica a um ambiente intensamente degradado e à ausência de políticas eficazes de controle ambiental (Rocha *et al.*, 1988).

Três décadas depois, novas pesquisas baseadas em séries temporais (2003–2008) confirmaram estatisticamente a forte associação entre poluição atmosférica e aumento das internações por doenças respiratórias e cardiovasculares (Nardocci *et al.*, 2013). Verificou-se que incrementos de 10 µg/m³ em material particulado (PM₁₀) estavam relacionados a elevação de 4,25% nas internações respiratórias gerais e 5,74% entre crianças menores de cinco anos. Entre adultos acima de 39 anos, observou-se crescimento nas hospitalizações por doenças cardiovasculares, evidenciando os impactos diretos da poluição sobre a morbidade populacional. Esses resultados quantificam o custo humano de um modelo de desenvolvimento que negligenciou a sustentabilidade ambiental e a saúde coletiva.

A persistência desses agravos ao longo dos anos revela problemas estruturais agravados pela histórica deficiência dos serviços de saúde locais. Na década de 1980, o município não dispunha de leitos de terapia intensiva nem de ambulatórios especializados em pneumologia. Mesmo décadas depois, verificava-se a carência de uma rede pública capaz de diagnosticar, tratar e acompanhar adequadamente os casos de doenças relacionadas à poluição atmosférica. Tal cenário evidencia um ciclo de vulnerabilidade: a mesma atividade econômica que gera renda e empregos é também responsável por produzir e perpetuar o adoecimento da população.

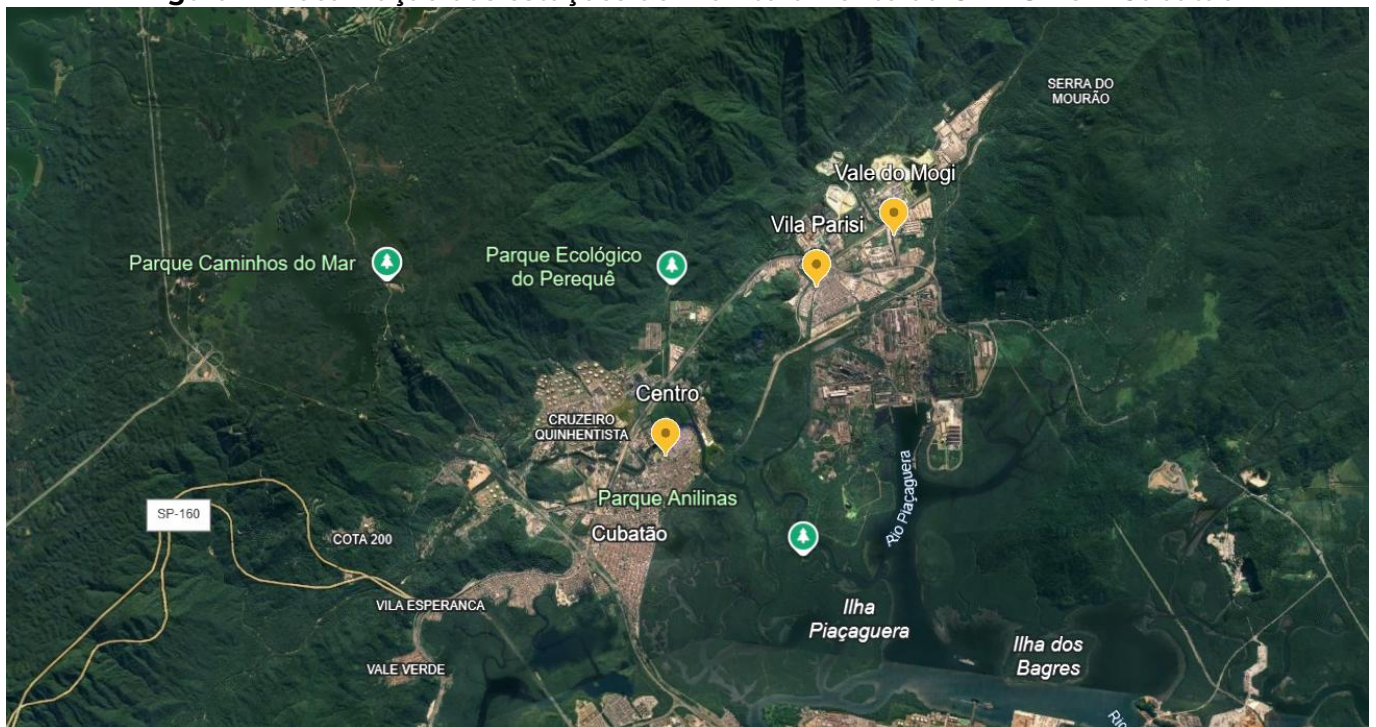
O legado socioambiental de Cubatão constitui um importante alerta sobre os riscos de negligenciar a proteção à saúde em nome do crescimento econômico. Embora as políticas de controle de emissões tenham proporcionado melhorias graduais na qualidade do ar, os efeitos acumulados de décadas de poluição ainda persistem na saúde e nas condições de vida da população. Esse panorama reforça a necessidade de políticas públicas integradas e permanentes, que unam monitoramento ambiental contínuo, investimentos em infraestrutura de saúde e estratégias de mitigação de emissões industriais e veiculares.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 DADOS DE SUPERFÍCIE

A presente pesquisa foi desenvolvida a partir de dados secundários de qualidade do ar, disponibilizados pela CETESB por meio de sua rede automática de monitoramento e da plataforma QUALAR. O município de Cubatão/SP conta com estações de monitoramento localizadas em áreas estratégicas, como Centro, Vila Parisi e Vale do Mogi, representando regiões de diferentes influências antrópicas — área central, proximidade com o polo industrial e zona de tráfego intenso (CETESB, 2023) A figura 1, ilustra a localização das estações da CETESB mencionadas anteriormente.

Figura 1 – Localização das estações de monitoramento da CETESB em Cubatão



Fonte: Google Earth (2025).

Os arquivos utilizados para análise estavam no formato .csv, contendo registros horários de poluentes, meteorologia e demais parâmetros. Para esta pesquisa, foram extraídos os valores de dióxido de nitrogênio (NO₂), que posteriormente foram tratados estatisticamente. O recorte temporal da análise compreendeu os anos de 2015 a 2025, permitindo a comparação de três períodos distintos:

- Pré-pandemia: 2015 a 2019;
- Pandemia: 2020 a 2021;
- Pós-pandemia: 2022 a 2025.

Essa divisão temporal fundamenta-se em estudos que evidenciaram reduções significativas nas emissões atmosféricas durante a pandemia de COVID-19, atribuídas à diminuição das atividades industriais e do tráfego veicular (Moreira *et al.*, 2021; Nakada & Urban, 2020).

2.2 TRATAMENTO DOS DADOS

A etapa de tratamento e análise dos dados foi realizada em ambiente computacional *Google Colab*, utilizando a linguagem de programação *Python* e as bibliotecas *Pandas*, *Matplotlib* e *Seaborn*, que são amplamente empregadas em estudos de qualidade do ar pela capacidade de manipulação de séries temporais e visualização estatística (Mckinney, 2010; Hunter, 2007; Waskom, 2021).

Conforme recomendado por Vianna Jr e De Come (2025), a fim de eliminar valores ausentes, negativos ou códigos de falha utilizados pelo sistema de monitoramento (como -99, -999), foi feito um pré-tratamento, eliminando estes valores indesejados.

Inicialmente, foram calculadas as médias diárias e mensais de NO₂ a partir das séries horárias, procedimento recomendado pela Agência Europeia de Meio Ambiente (EEA, 2019) para reduzir variações pontuais e permitir comparações temporais. Posteriormente, calcularam-se as médias anuais aritméticas, utilizadas como parâmetro para comparação com os limites de referência estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) e pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que adota a Meta Intermediária 2, MI2 (20 µg/m³) como valor de controle no Brasil.

As análises estatísticas compreenderam o cálculo de medidas de tendência central (média e mediana), dispersão (desvio-padrão) e amplitude (valores mínimos e máximos), bem como a elaboração de gráficos de séries temporais e *boxplots* para avaliar a distribuição das concentrações nos diferentes períodos. Além disso, foram calculadas as frequências relativas de superação dos limites (OMS e CETESB MI2), expressas em porcentagem do número de anos em que as médias anuais ultrapassam os valores de referência.

Esse conjunto metodológico permitiu não apenas observar a evolução histórica das concentrações de NO₂ em Cubatão, mas também identificar diferenças sazonais e comportamentais associadas aos períodos pré-pandemia, pandemia e pós-pandemia. A integração entre dados oficiais, tratamento estatístico e comparação com padrões de qualidade do ar confere ao estudo robustez e relevância científica para subsidiar discussões sobre políticas ambientais e saúde pública.

2.2.1 Ferramentas de análise

Foram utilizados diversos métodos gráficos e tabelas com o objetivo de apresentar e analisar as informações de maneira clara e organizada. Os métodos utilizados foram:

- *Boxplots*, para representar a variação da concentração de NO₂ por estação e por período, destacando a dispersão e possíveis outliers.
- Séries temporais, para identificar a tendência histórica da poluição atmosférica no município.
- Gráficos comparativos de estatísticas, incluindo médias, medianas, desvios, valores mínimos e máximos, com linhas de referência dos padrões normativos.
- Tabela de ultrapassagens, que indica a porcentagem de vezes em que os valores observados excederam os limites de qualidade do ar.

2.2.2 Normas de comparação

A avaliação da qualidade do ar foi feita de dois referenciais normativos:

- Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021), que recomenda para o NO₂ o valor guia de 10 µg/m³ (média anual);
- CETESB (2024), que adota metas intermediárias de qualidade do ar. Neste estudo, foi utilizada a Meta Intermediária 2 (MI2), correspondente a 20 µg/m³ (média anual), conforme Resolução CONAMA nº 491/2018 e alinhamento progressivo à diretriz da OMS.

Os valores obtidos em cada estação foram comparados com esses limites, permitindo verificar a adequação ou não da qualidade do ar em Cubatão no período analisado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a análise dos dados obtidos da CETESB (2025), verificou-se que a Estação Centro apresentou lacunas significativas de medição entre o último semestre de 2022 e o primeiro semestre de 2025, com ausência parcial ou total de registros de NO₂ em alguns meses. Essas interrupções estão relacionadas a processos de calibração, manutenção técnica e substituição de sensores, situações recorrentes em estações automáticas de monitoramento atmosférico.

Gráfico 1 – Série temporal completa de NO₂ (2015-2025) (µg/m³)



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

A série temporal analisada no presente trabalho compreende um período de quase 10 anos de dados (2015 a 2025). Os dados apresentados no gráfico 1, mostram a distribuição da concentração de NO₂ do período citado. Neste gráfico é possível observar que as concentrações sempre estão acima dos valores padrões estabelecidos pela legislação estadual, bem como os valores de recomendação da OMS, esses resultados indicam que a qualidade do ar na região permanece comprometida durante todo o período estudado.

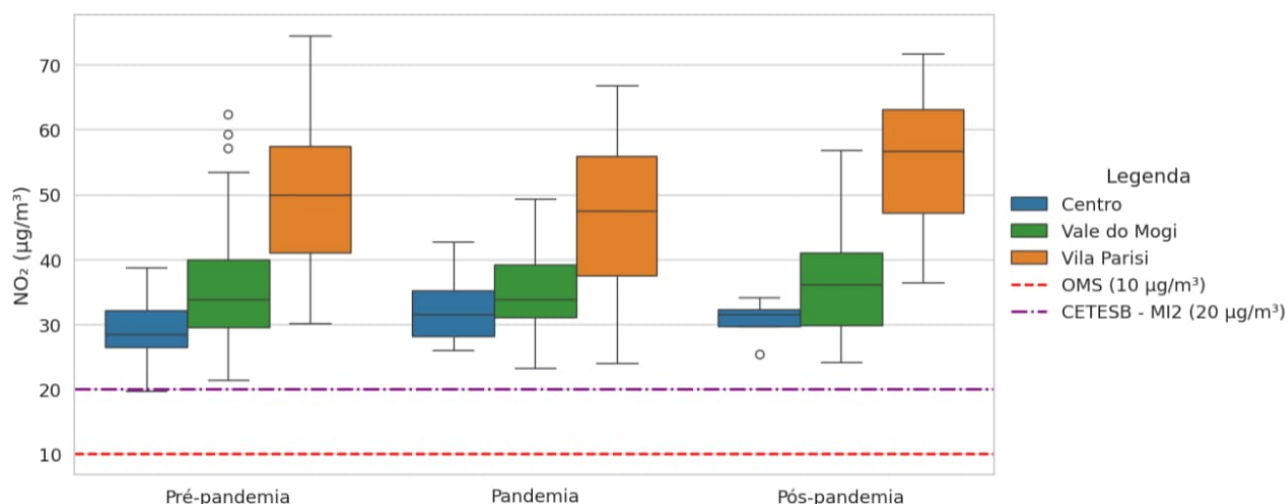
Durante os anos de 2020 e 2021, nota-se uma redução temporária nas concentrações médias, coincidindo com o período da pandemia de COVID-19, quando houve queda significativa nas atividades industriais e no tráfego urbano. Ainda assim, mesmo nesse intervalo de menor emissão, os níveis de NO₂ permaneceram superiores aos valores recomendados, sugerindo que as fontes fixas continuam sendo importantes contribuintes locais.

A partir de 2022, os valores voltaram a aumentar, acompanhando a retomada econômica e o restabelecimento do fluxo veicular e industrial, o que reforça a influência direta das emissões antrópicas sobre a poluição atmosférica em Cubatão.

Além disso, o comportamento cíclico observado ao longo da série temporal indica uma forte dependência das condições meteorológicas, especialmente dos padrões de circulação de ar e estabilidade atmosférica, que influenciam diretamente a dispersão de poluentes. Entre as estações, Vila Parisi apresentou as maiores concentrações médias de NO₂, o que pode ser atribuído à proximidade com o polo industrial e maior densidade de tráfego.

Mesmo após uma década de monitoramento, não se observa tendência de redução sustentável das concentrações de NO₂, evidenciando que as políticas locais de controle da qualidade do ar ainda são insuficientes para promover uma melhoria significativa na atmosfera da cidade.

Gráfico 2 – Comparação de NO₂ por período e estação (µg/m³)



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os dados apresentados no Gráfico 2 mostram a distribuição das concentrações de dióxido de nitrogênio (NO₂) em Cubatão ao longo dos três períodos avaliados, sendo a pré-pandemia, pandemia e pós-pandemia.

No período pré-pandemia, observam-se níveis elevados de NO₂, especialmente na estação Vila Parisi, onde passam de 50 µg/m³, refletindo a forte influência das atividades industriais concentradas nessa região. Já nas estações Vale do Mogi e Centro, as concentrações situam-se entre 30 e 40 µg/m³, indicando menor impacto direto de emissões industriais, mas

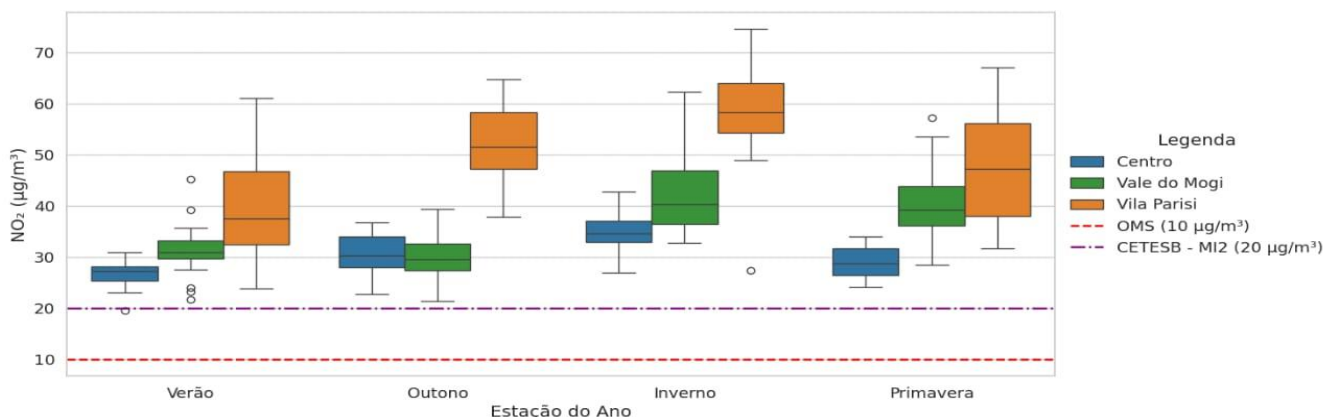
ainda assim acima dos valores de referência estabelecidos pela OMS (10 µg/m³) e pela CETESB (MI2 20 µg/m³).

Durante a pandemia, nota-se uma redução significativa nas concentrações de NO₂ em todas as estações de monitoramento. Essa queda está diretamente associada às medidas restritivas impostas, como redução do tráfego urbano, fechamento temporário de indústrias e comércios, além da diminuição do transporte de carga que resultou em menores emissões de poluentes atmosféricos. Esse fenômeno pode ser interpretado como um “experimento natural” de mitigação da poluição, demonstrando de forma concreta a relação direta entre atividade antrópica e degradação da qualidade do ar.

No período pós-pandemia, observa-se uma recuperação gradual dos níveis de NO₂, acompanhando o retorno das atividades econômicas e da circulação de veículos, embora sem atingir os picos máximos observados antes. Esse comportamento reforça o caráter temporário da melhoria ambiental ocorrida durante a pandemia, evidenciando que, sem mudanças estruturais nas fontes emissoras, as concentrações tendem a retornar aos patamares anteriores. Esse comportamento observado assemelha-se com o de estudos anteriores realizados na Região Metropolitana de São Paulo, onde a suspensão das atividades econômicas influenciou diretamente na redução de poluentes e a retomada mostrou o aumento das concentrações de tais (Moreira *et al.*, 2021; Andrade *et al.*, 2022).

Entre as estações analisadas, a estação Centro apresentou os menores valores em todos os períodos, o que pode ser explicado pela menor influência direta de fontes industriais e pela presença de tráfego urbano menos intenso nessa região, em comparação às áreas industriais de Vila Parisi e Vale do Mogi.

Gráfico 3 – NO₂ por estação do ano(µg/m³)



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os dados apresentados no Gráfico 3 evidenciam a variação sazonal das concentrações médias de dióxido de nitrogênio (NO₂) nas estações de monitoramento de Cubatão, obtidas a partir da agregação dos meses correspondentes a cada estação do ano (verão, outono, inverno e primavera), permitindo identificar o comportamento do poluente ao longo do ciclo anual.

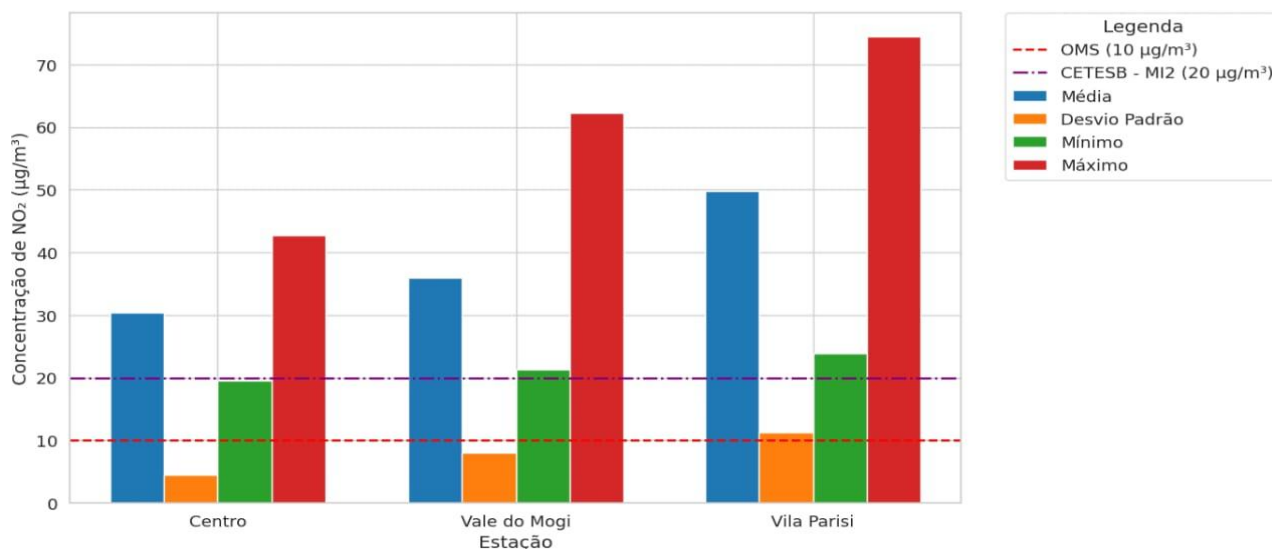
Observa-se que as maiores concentrações de NO₂ ocorrem durante o inverno e a primavera, especialmente na estação Vila Parisi, onde os valores variam entre 60 e 70 µg/m³. Esse padrão pode ser explicado pelas condições meteorológicas típicas do inverno, caracterizadas por baixa dispersão atmosférica e inversões térmicas, que dificultam a diluição dos poluentes na troposfera (Silva *et al.*, 2020). Na primavera, ocorre uma retomada gradual das atividades industriais e do tráfego veicular, após o período mais frio, o que contribui para o aumento das emissões e manutenção de níveis elevados de poluentes.

Durante o verão, as concentrações diminuem significativamente, reflexo da maior instabilidade atmosférica, aumento da radiação solar e maior frequência de chuvas, que favorecem a dispersão e a remoção dos poluentes (CETESB, 2025). Dessa forma, o inverno se destaca como o período mais crítico, apresentando concentrações que frequentemente ultrapassam os limites estabelecidos pela OMS (10 µg/m³) e pela CETESB (MI2 20 µg/m³).

A análise dessa sazonalidade demonstra a influência direta das variáveis meteorológicas sobre a qualidade do ar, destacando a necessidade de políticas públicas específicas para períodos de maior risco, como o inverno, que incluam controle rigoroso de emissões veiculares e industriais, além do incentivo ao uso de transportes sustentáveis e monitoramento intensificado.

Entre as estações avaliadas, a Vila Parisi permanece como a região mais impactada, seguida por Vale do Mogi e, por fim, o Centro, confirmando o efeito combinado da localização industrial e da densidade do tráfego urbano sobre a poluição atmosférica local.

Gráfico 4 – Resumo estatístico Anual Médio de NO₂ (µg/m³)



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os dados apresentados no Gráfico 4 mostram o resumo estatístico das concentrações médias anuais de dióxido de nitrogênio (NO₂) para as três estações de monitoramento de Cubatão: Centro, Vale do Mogi e Vila Parisi.

Em todas as estações, observa-se que as médias anuais de NO₂ ultrapassam os limites estabelecidos pela OMS e pela CETESB, mesmo considerando a meta intermediária 2 de 20 µg/m³, evidenciando uma situação persistente de má qualidade do ar no município.

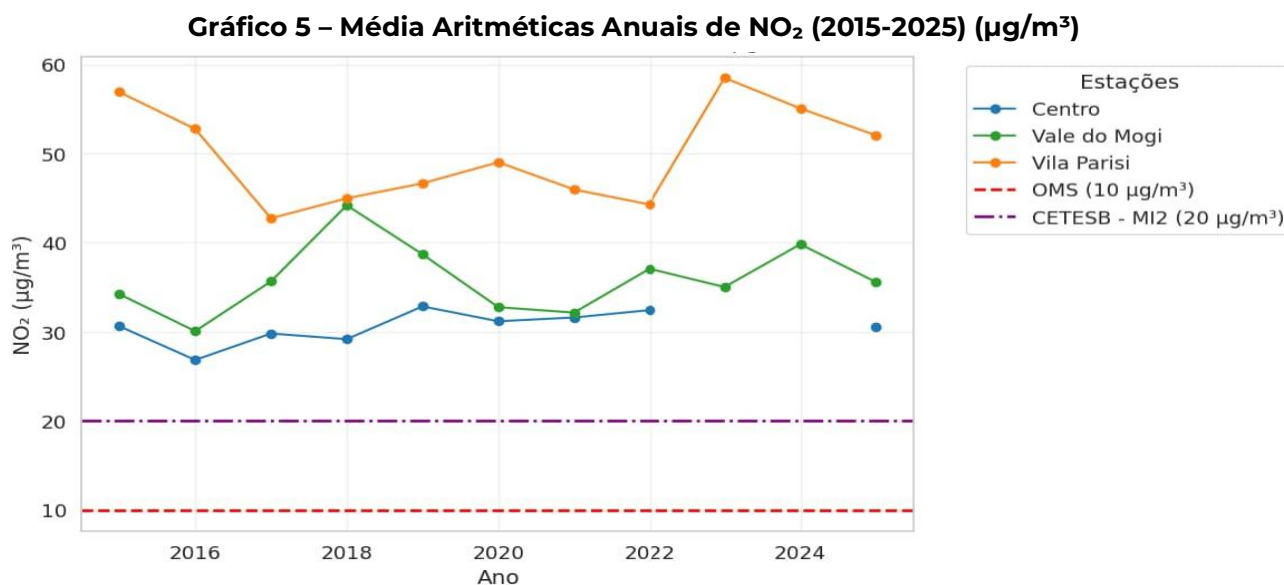
A estação Centro apresenta valores médios próximos de 30 µg/m³, enquanto Vale do Mogi e Vila Parisi registram concentrações progressivamente mais elevadas, atingindo cerca de 50 µg/m³ em Vila Parisi. Essa diferença espacial reflete a distribuição desigual das fontes emissoras, sendo Vila Parisi a região mais próxima das atividades industriais e com maior densidade de tráfego pesado, o que contribui diretamente para o aumento da concentração de NO₂.

O desvio padrão reduzido na estação Centro indica uma menor variabilidade temporal das concentrações, sugerindo que as emissões na região são mais estáveis e predominantemente associadas ao tráfego urbano. Por outro lado, o desvio padrão mais elevado em Vila Parisi aponta para uma maior oscilação dos níveis de poluição, possivelmente influenciada por fontes emissoras intermitentes, como paradas e retomadas de processos industriais.

A diferença entre os valores mínimos e máximos mostra que episódios críticos de poluição não são eventos isolados, mas ocorrem de forma recorrente ao longo dos anos. Tal comportamento reforça a necessidade de ações contínuas de mitigação, fortalecimento das

políticas de controle de emissões industriais e veiculares, além da expansão do monitoramento atmosférico em tempo real.

Esses resultados evidenciam que, mesmo após uma década de monitoramento, não há tendência de melhoria significativa na qualidade do ar de Cubatão, reforçando a importância de estratégias públicas de longo prazo para garantir o cumprimento dos padrões de qualidade do ar e proteger a saúde da população exposta.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os dados apresentados no Gráfico 5 mostram as médias aritméticas anuais das concentrações de dióxido de nitrogênio (NO₂) nas estações Centro, Vale do Mogi e Vila Parisi, comparadas aos limites de referência estabelecidos pela OMS (10 µg/m³) e pela CETESB (MI2 20 µg/m³).

Observa-se que, ao longo de todo o período analisado, nenhuma das estações apresentou médias anuais dentro dos padrões recomendados, caracterizando uma situação persistente de má qualidade do ar em Cubatão. A estação Vila Parisi manteve os maiores valores, com médias anuais frequentemente acima de 50 µg/m³, refletindo a forte influência das atividades industriais e logísticas da região.

Em 2018, observa-se um pico expressivo na estação Vale do Mogi, com concentrações superiores a 40 µg/m³. Esse aumento pode estar associado a uma intensificação das emissões veiculares naquele período. Moreira *et al.* (2021) mostram que a redução na circulação da frota veicular na cidade de São Paulo resultou em queda nas concentrações de NO₂, reforçando a influência direta do tráfego sobre esse poluente. Nos demais anos, as concentrações de NO₂ em

Vale do Mogi se mantiveram próximas ou ligeiramente abaixo desse valor, indicando uma estabilidade relativa, porém ainda acima dos limites recomendados pelas normas ambientais.

A Estação Centro apresenta uma lacuna de dados entre o último semestre de 2022 e o primeiro semestre de 2025, conforme já discutido anteriormente, em função de manutenções e calibrações dos equipamentos. Essa ausência de registros explica a interrupção da série temporal nessa estação, sem comprometer a tendência geral observada no conjunto dos dados.

Durante o período da pandemia, observou-se uma redução temporária das médias anuais, especialmente nas estações Vale do Mogi e Vila Parisi, resultado direto da diminuição das atividades industriais e do tráfego urbano devido às medidas restritivas impostas pela COVID-19. No entanto, a partir de 2022, as concentrações voltarão a crescer, acompanhando a retomada econômica e reforçando a influência direta das emissões antrópicas na poluição atmosférica local.

De modo geral, os resultados do gráfico evidenciam que, mesmo após uma década de monitoramento, não há tendência de redução sustentável nas concentrações de NO₂. Isso sugere que as medidas atuais de controle de emissões podem não ser suficientes para promover reduções consistentes nas concentrações do poluente.

Do ponto de vista da saúde pública, níveis cronicamente elevados de NO₂ estão associados a aumento de internações por doenças respiratórias — como asma, bronquite e doença pulmonar obstrutiva crônica, além de impactos cardiovasculares e imunológicos (WHO, 2021; CETESB, 2023). Em Cubatão, região historicamente marcada por altos índices de poluição, essa exposição contínua representa um risco significativo à população vulnerável, em especial crianças e idosos.

Esses resultados reforçam a necessidade urgente de adoção de medidas mitigadoras, como modernização de processos industriais, controle mais rigoroso das emissões veiculares e incentivo a alternativas de transporte limpo, de modo a alinhar a qualidade do ar local aos padrões.

Tabela 1 – Resumo estatístico Anual Médio de NO₂ (µg/m³)

Estações	Indicadores			
	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média
Centro	19,60	42,74	4,45	30,45
Vale do Mogi	21,34	62,30	8,01	35,93
Vila Parisi	23,93	74,51	11,34	49,84

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os dados apresentados na Tabela 1 mostram o comportamento estatístico anual das concentrações de NO₂ nas estações de monitoramento de Cubatão. Observa-se que, ao longo de todo o período, as médias anuais permanecem acima dos valores recomendados pela OMS (10 µg/m³) e da CETESB (MI2 20 µg/m³), o que evidencia uma condição persistente de má qualidade do ar.

A estação Vila Parisi apresenta os maiores valores de concentração média (49,84 µg/m³) e desvio padrão (11,34), reflexo da influência direta das atividades industriais do polo petroquímico e siderúrgico da região. Em contraste, o Centro registra os menores valores médios (30,45 µg/m³) e menor variabilidade, caracterizando uma área predominantemente urbana com menor influência industrial (CETESB, 2025)

Esses resultados reafirmam as conclusões de Rocha *et al.* (1988) e Nardocci *et al.* (2013), que identificaram Vila Parisi como a localidade mais vulnerável à poluição atmosférica em Cubatão devido à proximidade das fontes fixas emissoras e à topografia que dificulta a dispersão dos poluentes.

Tabela 2 – Resumo estatístico de NO₂ por período e estação (2015-2025)

Períodos	Estações	Média	Mediana	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
Pré pandemia	Centro	29,10	28,48	4,24	38,78	19,60
	Vale do Mogi	36,02	33,81	9,49	62,30	21,34
	Vila Parisi	49,33	49,99	11,45	74,51	30,11
Pandemia	Centro	31,96	31,54	4,35	42,74	25,89
	Vale do Mogi	35,16	33,75	5,95	49,27	23,18
	Vila Parisi	46,47	47,44	10,96	66,83	23,94
Pós Pandemia	Centro	30,57	31,47	3,72	34,04	25,31
	Vale do Mogi	36,91	36,06	8,40	56,90	24,08
	Vila Parisi	55,48	56,66	9,77	71,68	36,40

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os dados apresentados na Tabela 2 mostram o comportamento estatístico da evolução das concentrações de NO₂ nos períodos pré-pandemia, pandemia e pós-pandemia, observa-se que, durante o período pré-pandemia (2015–2019), os valores médios eram elevados, sobretudo em Vila Parisi, com concentrações acima de 50 µg/m³.

Com a chegada da pandemia (2020–2021), houve redução temporária dos níveis de NO₂ em todas as estações, efeito associado à queda nas atividades econômicas e à restrição do tráfego veicular (Moreira *et al.*, 2021; CETESB, 2022). Contudo, no período pós-pandemia (2022-2025), observa-se nova elevação das concentrações, especialmente em Vila Parisi, que retorna a médias próximas de 55 µg/m³, demonstrando retomada das emissões industriais e urbanas.

A estação Centro apresenta as menores variações entre os períodos, reforçando seu perfil urbano com menor influência direta das indústrias. Esses resultados mostram a relação direta entre intensidade de atividades antrópicas e níveis de poluição atmosférica.

Tabela 3 – Média Aritméticas Anuais (2015- 2025)

Estações	Centro	Vale do Mogi	Vila Parisi
Anos			
2015	30,61	34,21	56,89
2016	26,83	30,06	52,75
2017	29,79	35,64	42,73
2018	29,16	44,18	44,97
2019	32,83	38,68	46,65
2020	31,17	32,75	49,02
2021	31,59	32,14	45,96
2022	32,42	37,08	44,27
2023	-	35,01	58,49
2024	-	39,81	55,06
2025	30,57	35,56	52,03

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os dados apresentados na Tabela 3 mostram as médias aritméticas anuais das concentrações de dióxido de nitrogênio (NO₂) nas estações Centro, Vale do Mogi e Vila Parisi, comparadas aos limites de referência estabelecidos pela OMS (10 µg/m³) e pela CETESB (MI2, 20 µg/m³). Ressalta-se que a ausência de valores para a estação Centro decorre da indisponibilidade desses dados na plataforma QUALAR.

Os maiores picos de concentrações nas estações ocorreram em 2018 na Vale do Mogi 44,18 µg/m³, 2019 no Centro 32,83 µg/m³ e em 2023 na Vila Parisi 58,49 µg/m³. Esses aumentos podem estar associados à intensificação das atividades industriais e veiculares nesse período.

Nos anos (2020 e 2021), observa-se uma redução temporária nas médias anuais, consequência das restrições de mobilidade e da desaceleração industrial impostas pela pandemia de COVID-19. Apesar dessa queda, as concentrações permaneceram acima dos valores recomendados, indicando que a redução das emissões foi pontual e não estrutural.

Com a retomada das atividades econômicas, as médias voltaram a subir em 2023 e 2024, especialmente em Vila Parisi, onde os valores médios ficaram próximos de 58 µg/m³.

De forma geral, a Estação Vila Parisi manteve as maiores médias anuais do período (≈ 58 µg/m³), seguida por Vale do Mogi (≈ 44 µg/m³) e Centro (≈ 32 µg/m³).

Essa hierarquia reflete a distribuição das fontes emissoras, sendo Vila Parisi a área de maior influência industrial, Vale do Mogi uma zona mista de tráfego e indústria, e o Centro uma área predominantemente urbana, com menor densidade de fontes fixas.

Esses resultados reforçam que a poluição pôr NO₂ em Cubatão mantém-se em níveis preocupantes, exigindo políticas ambientais mais eficazes, modernização dos sistemas de controle de emissões e planejamento urbano integrado, de modo a reduzir a exposição da população aos riscos respiratórios associados a esse poluente.

Tabela 4 – Ultrapassagens de NO₂ (% de vezes acima dos limites)

Estações	Indicadores	
	OMS (10 ug/m ³)	CETESB MI2 (20 ug/m ³)
Centro	81,82	81,82
Vale do Mogi	100	100
Vila Parisi	100	100

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os dados apresentados na Tabela 4 mostram a avaliação da frequência de ultrapassagens dos limites normativos das concentrações de dióxido de nitrogênio (NO₂) nas estações Centro, Vale do Mogi e Vila Parisi, comparadas aos limites de referência estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 10 µg/m³) e pela CETESB – Meta Intermediária 2 (20 µg/m³). Essas porcentagens foram calculadas com base em todo o conjunto de dados compreendido entre 2015 e 2025, permitindo uma análise abrangente do comportamento do poluente ao longo da série histórica. Neste conjunto de dados, observa-se que as estações Vale do Mogi e Vila Parisi registraram 100% de superações em ambos os limites, evidenciando que todas as médias anuais excederam os padrões de qualidade do ar recomendados. Esse comportamento demonstra um quadro de não conformidade crônica, refletindo a influência contínua das atividades industriais e do tráfego veicular intenso nessas regiões.

A Estação Centro apresentou um percentual de 81% de superações, valor inferior em razão da lacuna de dados registrada entre o último semestre de 2022 e o primeiro semestre de 2025, decorrente de processos de calibração, manutenção e substituição de sensores. Ainda assim, os dados disponíveis indicam que os níveis de NO₂ permaneceram acima dos valores estabelecidos pela OMS e CETESB, sugerindo que, se os dados ausentes fossem contabilizados, o índice real de ultrapassagens seria possivelmente ainda maior.

Esse padrão reforça o diagnóstico de que a poluição atmosférica em Cubatão persiste de forma estrutural, com destaque para as estações Vila Parisi e Vale do Mogi, localizadas em áreas com maior densidade industrial e veicular. Resultados semelhantes foram observados por

Rocha *et al.* (1988) e Nardocci *et al.* (2013), que apontaram Vila Parisi como a região mais vulnerável à exposição de poluentes, em função da proximidade com o polo petroquímico e da topografia que dificulta a dispersão.

Os índices elevados e recorrentes de NO₂ revelam uma exposição prolongada da população a concentrações nocivas, com impactos diretos sobre a saúde respiratória, especialmente em crianças, idosos e portadores de doenças crônicas (OMS, 2021).

De forma geral, a análise confirma que nenhuma das estações de monitoramento apresentou conformidade com os padrões de qualidade do ar durante o período avaliado, evidenciando que, mesmo após quase uma década de monitoramento contínuo, a qualidade do ar em Cubatão permanece insatisfatória. Esse cenário reforça a necessidade de políticas públicas mais eficazes, modernização dos sistemas de controle de emissões e integração entre ações ambientais e de saúde pública, como forma de mitigar os impactos sociais e ambientais da poluição atmosférica.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das concentrações de dióxido de nitrogênio (NO₂) no município de Cubatão/SP, ao longo do período de 2015 a 2025, evidencia um quadro persistente de poluição atmosférica, especialmente nas áreas mais próximas ao polo industrial — Vila Parisi e Vale do Mogi. Nessas regiões, as médias anuais ultrapassam de forma recorrente os limites estabelecidos pela CETESB (Meta Intermediária 2 – 20 µg/m³) e pela Organização Mundial da Saúde (OMS – 10 µg/m³), confirmando a gravidade do problema ambiental e de saúde pública local.

Mesmo com avanços tecnológicos e políticas de controle de emissões, as concentrações de NO₂ permanecem acima dos padrões de qualidade do ar, caracterizando uma situação crônica de não conformidade ambiental. Observou-se uma redução temporária durante o período pandêmico (2020–2021), reflexo da diminuição das atividades industriais e da circulação veicular. Contudo, com a retomada econômica no pós-pandemia (2022–2025), houve nova elevação dos níveis de poluentes, sobretudo na estação Vila Parisi, que registrou as maiores médias anuais e variações sazonais mais acentuadas.

Os resultados obtidos — em especial nas Tabelas 3 e 4 — indicam que 100% das medições em Vale do Mogi e Vila Parisi excederam simultaneamente os valores de referência da OMS e da CETESB, enquanto o Centro apresentou 81% de superações, resultado

parcialmente afetado por lacunas de medição entre 2022 e 2025. Esse cenário reforça a necessidade de ações imediatas de mitigação, voltadas à redução das emissões e ao fortalecimento do monitoramento ambiental contínuo.

Diversos estudos reforçam a relação direta entre a elevação das concentrações de NO₂ e o aumento da incidência de doenças respiratórias, especialmente em crianças, idosos e indivíduos com comorbidades (Nardocci *et al.*, 2013; WHO, 2021). Assim, a busca pelo cumprimento dos limites estabelecidos pela OMS deve envolver múltiplas frentes:

- Renovação e modernização da frota veicular, especialmente de veículos pesados;
- Manutenção periódica dos motores e catalisadores voltados à redução de NO₂;
- Fiscalização rigorosa dos combustíveis e emissões industriais;
- Adequação dos processos produtivos às metas internacionais de controle atmosférico.

Por fim, recomenda-se a ampliação e modernização da rede de estações automáticas da CETESB, garantindo a continuidade e confiabilidade dos registros. O monitoramento sistemático, aliado a políticas públicas integradas entre os setores industrial, de transporte e saúde ambiental, é essencial para reduzir os impactos do NO₂ e assegurar a melhoria da qualidade do ar e do bem-estar da população cubatense.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Izabel da Silva; ARAUJO, Elaine Cristina; CORRÊA, Thaís; MACEDO, Fernanda de Mendonça; LANDULFO, Eduardo. *Análise espaço-temporal de NO₂ na região metropolitana de São Paulo*. Holos Environment (Online), v. 21, p. 436-444, 2022.

<https://doi.org/10.14295/holos.v21i4.12461>

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Padrões de qualidade do ar*. São Paulo: CETESB, 2025. Disponível em:

https://www.cetesb.sp.gov.br/cetesb/qualidade_ambiental/ar/informacoes_basicas/padroes_de_qualidade_do_ar.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Boletim Anual da Qualidade do Ar para o Estado de São Paulo – 2023**. São Paulo: CETESB, 2023. Disponível em:

https://www.cetesb.sp.gov.br/cetesb/qualidade_ambiental/ar/publicacoes_e_relatorios/boletim_anual

CETESB. Sistema QUALAR - *Qualidade do ar*. 2021. Disponível em:

<https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>

CONAMA. **Resolução n° 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar e altera as resoluções CONAMA n° 03/1990 e n° 436/2011. Diário Oficial da União, Brasília, 2018.

HUNTER, J. D. **Matplotlib: A 2D graphics environment**. Computing in Science & Engineering, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007. Doi: 10.1109/MCSE.2007.55

McKINNEY, W. **Python for Data Analysis**. Sebastopol: O'Reilly Media, 2010

NAKADA, L.Y.K. E URBAN, R.C. (2020) COVID-19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil, Sci. Total Environ, 730, 139087, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139087>

MOREIRA, Gregori de Arruda; ANDRADE, Izabel da Silva; CACHEFFO, Alexandre; YOSHIDA, Alexandre Calzavara; GOMES, Antonio Arleques; SILVA, Jonatan João da; LOPES, Fábio Julianoda Silva; LANDULFO, Eduardo. **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, p. 100813, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100813>

NARDOCCI, A. C. et al. **Air pollution and respiratory and cardiovascular diseases: a time series study in Cubatão, Brazil (2000–2009)**. Environmental Health, v. 12, n. 15, p. 1–9, 2013. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00150012>

OMS – Organização Mundial da Saúde. **WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide**. Geneva: WHO, 2021.

ROCHA L.E., FREITAS C.U., FERREIRA J.N.N., FARIA C.G., KUMAGAI F.U. **Dados comparativos de morbidade hospitalar do município de Cubatão e do Estado de São Paulo (Brasil)**. Rev Saúde Pública 1988; 22:118-31.

SEGUEL, Rodrigo J.; GALLARDO, Laura; OSSES, Mauricio; ROJAS, Néstor Y.; NOGUEIRA, Thiago; MENARES, Camilo; ANDRADE, Maria de Fatima, BELALCÁZAR, Luis C.; CARRASCO, Paula; ESKES, Henk; FLEMING, Zoë L.; HUNEEUS, Nicolas; IBARRA-ESPINOSA, Sérgio; LANDULFO, Eduardo; LEIVA, Manuel; MANGONES, Sonia C.; MORAIS, Fernando G.; MOREIRA, Gregori A.; PANTOJA, Nicolás; ANDRADE, I. S. **Photochemical sensitivity to emissions and local meteorology in Bogotá, Santiago, and São Paulo**. Elementa: Science of the Anthropocene, v. 10, p. 1, 2022. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00044>

VERGNHANINI FILHO, R. **Emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) na combustão de fontes fixas e móveis na RMSP**. Revista IPT, São Paulo, n. 4, p. 45-56, 2016.

VIANNA JR., A. S.; DE COME, F. Analisando dados de qualidade do ar por machine learning. Vetor, Rio Grande, v. 35, n. 1, e18205, 2025.

WASKOM, M. **Seaborn: Statistical data visualization**. Journal of Open-Source Software, v. 6, n. 60, p. 3021, 2021.