



**MARIA YASMIN CANCIAN**

**POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA, SAÚDE PÚBLICA E BIOINDICADORES  
VEGETAIS: DESAFIOS PARA UMA ABORDAGEM INTEGRADA EM  
SOROCABA-SP**

Sorocaba

2026

**MARIA YASMIN CANCIAN**

**POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA, SAÚDE PÚBLICA E BIOINDICADORES  
VEGETAIS: DESAFIOS PARA UMA ABORDAGEM INTEGRADA EM  
SOROCABA-SP**

Dissertação de mestrado apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” na Área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientadora: Profa Dra. Sandra Regina  
Monteiro Masalskiene Roveda

Co-orientadora: Profa Dra. Renata Fracácio  
Francisco

Sorocaba

2026

C215p

Cancian, Maria Yasmin

Poluição atmosférica, saúde pública e bioindicadores vegetais: desafios para uma abordagem integrada em Sorocaba-SP / Maria Yasmin Cancian. -- Sorocaba, 2026

72 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientadora: Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda

Coorientadora: Renata Fracacio Francisco

1. Ar - Poluição. 2. Indicadores biológicos. 3. Saúde pública - Pesquisa. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

### **CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Poluição atmosférica, saúde pública e bioindicadores vegetais: desafios para uma abordagem integrada em Sorocaba-SP

**AUTORA:** MARIA YASMIN CANCIAN

**ORIENTADORA:** SANDRA REGINA MONTEIRO MASALSKIENE ROVEDA

**COORIENTADORA:** RENATA FRACÁCIO FRANCISCO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências Ambientais, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **RENATA FRACACIO FRANCISCO**  
Data: 26/06/2026 15:10:15-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª. Dra. RENATA FRACÁCIO FRANCISCO (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS

Documento assinado digitalmente  
 **KELLY CRISTINA TONELLO**  
Data: 26/06/2026 15:34:39-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª. Drª. KELLY CRISTINA TONELLO (Participação Presencial)

Documento assinado digitalmente  
 **ALEXANDRE MARCO DA SILVA**  
Data: 29/06/2026 07:13:17-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. ALEXANDRE MARCO DA SILVA (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS

Sorocaba, 24 de junho de 2026.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda e a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Renata Fracacio Francisco, expresso minha sincera gratidão pela orientação, dedicação, apoio e ensinamentos compartilhados ao longo do mestrado. Suas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para minha formação acadêmica e profissional.

Agradeço também ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba - ICTS-UNESP (Universidade Estadual Paulista) “Júlio de Mesquita Filho” e ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais - ICTS UNESP pela oportunidade da realização do Mestrado em Ciências Ambientais e suporte acadêmico.

Aos meus pais e a minha avó por todo o apoio e dedicação em todos os momentos.

## RESUMO

A poluição atmosférica representa um importante problema ambiental e de saúde pública, estando associada a impactos sobre os ecossistemas e ao aumento da ocorrência de doenças cardiorrespiratórias. Nesse contexto, os bioindicadores vegetais constituem ferramentas promissoras para o monitoramento ambiental, devido à sua capacidade de responder às alterações na qualidade do ar por meio de modificações morfofisiológicas. O presente estudo teve como objetivo avaliar as relações entre poluição atmosférica, saúde pública e potenciais bioindicadores vegetais na cidade de Sorocaba-SP, visando subsidiar estratégias integradas futuras de gestão ambiental. Trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa, de caráter documental, bibliográfico e ecológico observacional, estruturada em quatro etapas: análise comparativa de legislações ambientais nacionais e internacionais; levantamento de espécies vegetais com potencial bioindicador; avaliação de indicadores epidemiológicos relacionados a doenças cardiorrespiratórias; e análise estatística por meio de Modelos Lineares Generalizados (GLM). Foram utilizados dados de qualidade do ar obtidos junto à CETESB e informações epidemiológicas provenientes de bases governamentais referentes ao período de 2019 a 2024. Os resultados demonstraram que as concentrações dos poluentes monitorados em Sorocaba permaneceram, de modo geral, dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira vigente, embora tenham ultrapassado, em determinados períodos, os valores recomendados pela Organização Mundial da Saúde. O levantamento bibliográfico identificou 52 espécies vegetais com potencial para biomonitoramento atmosférico, apresentando diferentes respostas morfofisiológicas à exposição aos poluentes. As análises estatísticas indicaram associação significativa entre as concentrações de monóxido de nitrogênio (NO) e as taxas de internação por doenças respiratórias em crianças menores de quatro anos ( $p \leq 0,05$ ), evidenciando a suscetibilidade desse grupo etário aos efeitos da poluição atmosférica. Para os demais indicadores epidemiológicos avaliados, não foram observadas associações consistentes com os poluentes analisados. Conclui-se que a poluição atmosférica constitui um fator relevante para a saúde pública local e que os bioindicadores vegetais apresentam potencial como ferramentas complementares de monitoramento ambiental, embora ainda existam limitações para estabelecer relações diretas entre respostas vegetais e desfechos em saúde humana.

Palavras-chave: poluição atmosférica; qualidade do ar; bioindicadores vegetais; saúde pública; doenças respiratórias; modelos lineares generalizados.

## ABSTRACT

Air pollution represents a significant environmental and public health problem, being associated with impacts on ecosystems and an increased occurrence of cardiorespiratory diseases. In this context, plant bioindicators constitute promising tools for environmental monitoring, due to their ability to respond to changes in air quality through morphophysiological modifications. This study aimed to evaluate the relationships between air pollution, public health, and potential plant bioindicators in the city of Sorocaba-SP, aiming to support future integrated environmental management strategies. This is a qualitative-quantitative research, of a documentary, bibliographic, and observational ecological nature, structured in four stages: comparative analysis of national and international environmental legislation; survey of plant species with bioindicator potential; evaluation of epidemiological indicators related to cardiorespiratory diseases; and statistical analysis using Generalized Linear Models (GLM). Air quality data obtained from CETESB and epidemiological information from government databases for the period 2019 to 2024 were used. The results showed that the concentrations of pollutants monitored in Sorocaba generally remained within the limits established by current Brazilian legislation, although they exceeded, in certain periods, the values recommended by the World Health Organization. The literature review identified 52 plant species with potential for atmospheric biomonitoring, showing different morphophysiological responses to exposure to pollutants. Statistical analyses indicated a significant association between nitrogen monoxide (NO) concentrations and hospitalization rates for respiratory diseases in children under four years of age ( $p \leq 0.05$ ), highlighting the susceptibility of this age group to the effects of air pollution. For the other epidemiological indicators evaluated, no consistent associations were observed with the pollutants analyzed. It is concluded that air pollution is a relevant factor for local public health and that plant bioindicators have potential as complementary tools for environmental monitoring, although limitations still exist in establishing direct relationships between plant responses and human health outcomes.

**Keywords:** air pollution; air quality; plant bioindicators; public health; respiratory diseases; generalized linear models.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Implicações da inalação de partículas em suspensão com o dióxido de nitrogênio.....                                                                                    | 11 |
| <b>Figura 2.</b> Padrões estabelecidos para os poluentes atmosféricos na União Europeia, China, Índia, Estados Unidos e Brasil.....                                                     | 37 |
| <b>Figura 3.</b> Índice de emissão de dióxido de nitrogênio e padrões CONAMA na cidade de Sorocaba.....                                                                                 | 38 |
| <b>Figura 4.</b> Índice de emissão de MP10, fumaça e padrões CONAMA na cidade de Sorocaba.....                                                                                          | 39 |
| <b>Figura 5.</b> Emissão de dióxido de nitrogênio na Marginal Tietê (São Paulo).....                                                                                                    | 40 |
| <b>Figura 6.</b> Níveis de emissões de MP10 na Marginal Tietê.....                                                                                                                      | 41 |
| <b>Figura 7.</b> Índices de MP2,5 na Marginal Tietê (São Paulo).....                                                                                                                    | 41 |
| <b>Figura 8.</b> Emissões de material particulado MP10 na Índia comparadas aos padrões estabelecidos pela resolução Brasileira (CONAMA 506/24).....                                     | 42 |
| <b>Figura 9.</b> Emissões de material particulado dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) na Índia comparadas aos padrões estabelecidos pela resolução Brasileira (CONAMA 506/24)..... | 43 |
| <b>Figura 10.</b> Emissões de material particulado dióxido de nitrogênio (MP2,5) na Índia comparadas aos padrões estabelecidos pela resolução Brasileira (CONAMA 506/24).....           | 43 |
| <b>Figura 11.</b> Padrões estabelecidos pela OMS para a emissão de material particulado 10 µg e comparados com as emissões em Sorocaba.....                                             | 44 |
| <b>Figura 12.</b> Emissões de Dióxido de nitrogênio, padrões OMS para o poluente e comparados com as emissões em Sorocaba.....                                                          | 44 |
| <b>Figura 13.</b> Coeficiente geral de internação (CGI) para problemas do aparelho respiratório em crianças menores de 4 anos.....                                                      | 46 |
| <b>Figura 14.</b> Coeficiente geral de internação (CGI) para problemas do aparelho circulatório em idosos com mais de 60 anos.....                                                      | 46 |



## LISTA DE TABELAS

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Sazonalidade de cada uma das espécies bioindicadoras..... | 30 |
|----------------------------------------------------------------------------|----|

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                                                                  | <b>10</b> |
| <b>2. OBJETIVO.....</b>                                                                                                                                    | <b>13</b> |
| 2.1 Objetivo Geral.....                                                                                                                                    | 13        |
| 2.2 Objetivos específicos.....                                                                                                                             | 13        |
| <b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                                                                                                       | <b>14</b> |
| 3.1 Poluentes atmosféricos e legislações sobre qualidade do ar.....                                                                                        | 14        |
| 3.2 Métodos e técnicas oficiais para monitoramento da qualidade do ar.....                                                                                 | 18        |
| 3.3 Bioindicadores vegetais de poluição atmosférica: conceito, importância ambiental, principais parâmetros e alterações morfofisiológicas.....            | 21        |
| 3.4 Principais doenças associadas aos poluentes ambientais.....                                                                                            | 22        |
| <b>4. METODOLOGIA.....</b>                                                                                                                                 | <b>26</b> |
| 4.1 Etapa 1 – Análise das legislações ambientais e indicadores de qualidade do ar Legislação ambiental para poluição atmosférica no Brasil e no mundo..... | 26        |
| 4.2 Etapa 2 – Levantamento e avaliação de espécies vegetais com potencial bioindicador de poluição atmosférica na cidade de Sorocaba-SP.....               | 27        |
| 4.2.1 Estudo das alterações morfofisiológicas apresentadas pelas espécies vegetais selecionadas.....                                                       | 28        |
| 4.3. Etapa 3 – Análise epidemiológica das doenças associadas à poluição atmosférica.....                                                                   | 34        |
| 4.4. Etapa 4 - Análise estatística dos dados.....                                                                                                          | 35        |
| <b>5 RESULTADOS.....</b>                                                                                                                                   | <b>36</b> |
| 5.1 Os parâmetros para a qualidade do ar e suas relações com os níveis de poluição emitidos.....                                                           | 36        |
| 5.2 A problemática das doenças causadas pela poluição.....                                                                                                 | 43        |
| 5.2 Alterações morfofisiológicas nos vegetais expostos a poluição.....                                                                                     | 47        |
| 5.4 Resultados estatísticos (GLM):.....                                                                                                                    | 49        |
| <b>6. DISCUSSÃO.....</b>                                                                                                                                   | <b>50</b> |
| <b>7. CONCLUSÃO.....</b>                                                                                                                                   | <b>54</b> |
| <b>8. RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....</b>                                                                                                                       | <b>55</b> |
| <b>9. REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                                                                 | <b>55</b> |
| <b>10. APÊNDICES.....</b>                                                                                                                                  | <b>65</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

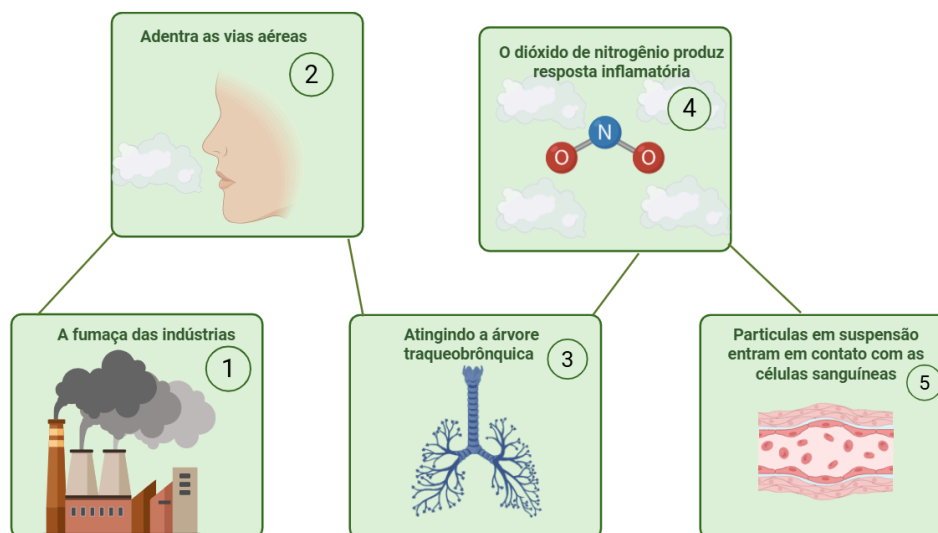
O estudo da poluição atmosférica foi significativamente impulsionado por um grave incidente ocorrido em 1948, no bairro de Donora, na Pensilvânia (EUA). Um nevoeiro de fuligem escura, originado por uma indústria siderúrgica, provocou mortes e graves consequências à saúde da população (Kaden; Hassan, 2024), em decorrência da emissão de fluoreto de hidrogênio e dióxido de enxofre na atmosfera (Melo, 2021). Desde então, a poluição do ar consolidou-se como um dos principais desafios ambientais e de saúde pública em escala global.

Atualmente, a cidade de Ulaanbaatar, na Mongólia, é reconhecida como uma das áreas mais poluídas do mundo, situação atribuída ao acelerado crescimento populacional (Zinicovskaia, 2024) e ao intenso uso de biomassa para aquecimento durante o rigoroso inverno, especialmente pela queima de carvão e utilização de lareiras (BBC, 2019). Contudo, essa problemática não se restringe a uma única região, mas afeta diferentes partes do planeta, seja em decorrência das queimadas na Amazônia, seja pela queima de carvão em países europeus.

As emissões de dióxido de enxofre e de material particulado estão diretamente associadas ao aumento da incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares e dermatológicas, representando um importante problema de saúde pública (Xiaoyu Gu et al., 2024). Nesse contexto, compreender os fatores que contribuem para a poluição atmosférica e identificar estratégias capazes de mitigar seus impactos tornam-se questões fundamentais, as quais orientam a pesquisa aqui apresentada.

As partículas em suspensão, ao penetrarem as vias aéreas, têm a capacidade de se depositar na árvore traqueobrônquica do sistema respiratório. O dióxido de nitrogênio pode induzir uma resposta inflamatória circulatória, pois possui potencial para ativar células inflamatórias quando as partículas em suspensão entram em contato com a corrente sanguínea (Figura 1) e se acumulam nos órgãos periféricos (Liu *et al*, 2025).

**Figura 1.** Implicações da inalação de partículas em suspensão com o dióxido de nitrogênio.



Created in BioRender.com 

Fonte: Autoria própria (software biorender).

Essas partículas finas e produtos químicos possuem a capacidade de penetrar nos pulmões e induzir a inflamação endotelial. No sistema circulatório, os sulfatos metálicos presentes na atmosfera podem levar a uma redução do tempo de coagulação. Na pele, o microbioma e o estresse oxidativo são os principais alvos dos materiais particulados atmosféricos. A urbanização promove alterações na homeostase do tecido conjuntivo, aumentando a suscetibilidade às alergias (Xiaoyu Gu *et al*, 2024).

Diante das consequências da exposição prolongada aos poluentes atmosféricos em suspensão, a pesquisa em questão pretende discutir a relevância das pesquisas que avaliam a poluição por meio de bioindicadores em espécies vegetais.

Estes bioindicadores revelam o nível de qualidade do ar por meio e das injúrias ocasionadas na morfologia e fisiologia de folhas e de raízes das plantas. Os

efeitos fitotóxicos são caracterizados por meio de análises físico-químicas das espécies, que avaliam as injúrias foliares, bem como alterações na quantidade de brotos e no alongamento das raízes, as quais variam de acordo com o ambiente em que as plantas estão inseridas (CETESB, 2007)

Um bioindicador é um indicador biológico que apresenta características capazes de identificar por meio de parâmetros físico-químicos as alterações no ambiente, sejam elas no solo, na água ou no ar. Devido à sensibilidade e capacidade de absorver as substâncias químicas poluentes do ar atmosférico (Schneider *et al*, 2024).

Essa ferramenta representa um indicador de alerta precoce, uma vez que por meio desses organismos é possível inferir a qualidade do ar e utilizá-la para monitorar e responder às condições ambientais do ambiente exposto. Existem categorias para classificar um bioindicador: sentinelas, que são organismos altamente sensíveis; detectores, que apresentam respostas às mudanças no ambiente; exploradores, cuja presença indica a presença de poluição e acumuladores, que absorvem e acumulam substâncias (Warnasuriya *et al*, 2023).

Quanto aos efeitos fitotóxicos na botânica, as plantas epífitas são reconhecidas como notáveis bioindicadores devido à sua capacidade de obter minerais e nutrientes diretamente do ar, em vez de um substrato, que resulta no armazenamento de poluentes atmosféricos (Costa *et al*, 2019; Giampaoli, 2021).

Portanto diante do exposto, a presente pesquisa, por meio de revisão literária, pretende responder com base na análise dos bancos de dados, qual é a relação entre a qualidade do ar da cidade de Sorocaba-SP com bioindicadores vegetais (morfofisiologia) e se tal relação pode ser um indicativo de comprometimento da saúde, de modo a elaborar índices que se apliquem na gestão de poluentes atmosféricos.

A exposição aos poluentes atmosféricos em Sorocaba-SP está associada ao aumento da ocorrência de doenças cardiorrespiratórias, enquanto o uso de bioindicadores vegetais ainda apresenta limitações para estabelecer correlações diretas com os agravos à saúde humana.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar, de forma exploratória, as relações entre qualidade do ar, indicadores epidemiológicos de doenças cardiorrespiratórias e o potencial uso de bioindicadores vegetais como ferramenta complementar para o monitoramento ambiental em Sorocaba-SP.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Comparar as legislações ambientais relacionadas à poluição atmosférica para identificar padrões e limites permitidos de poluição atmosférica a nível nacional, na Europa, América do Norte e Ásia.
- Realizar um levantamento das espécies vegetais presentes na região de estudo e compreender a interferência que a poluição atmosférica causa na morfologia e fisiologia de tecidos vegetais das espécies identificadas por meio da literatura, considerando-se aspectos sazonais.
- Selecionar dentre as espécies identificadas na região de estudo aquelas com maior potencial para serem utilizadas como bioindicadoras de poluição atmosférica, tendo como base o levantamento da literatura realizada.
- Avaliar, por meio de modelos lineares generalizados, associações entre concentrações atmosféricas de poluentes monitorados em Sorocaba-SP e indicadores epidemiológicos de internações e/ou óbitos por doenças respiratórias e cardiovasculares em grupos etários vulneráveis.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Poluentes atmosféricos e legislações sobre qualidade do ar**

A poluição do ar é caracterizada por material particulado em quantidade, concentração, tempo e exposição que interferem na manutenção da qualidade de vida e nocivo à saúde (CETESB, 2025) em diferentes contextos como o ar, solo, água, fauna e flora (MMA, 2025). A poluição pode estar desde o carbonato de cálcio até a fumaça preta emitida pelos veículos movidos à diesel.

Os poluentes são classificados em 2 tipos: primários e secundários, sendo os primários os contaminantes emitidos diretamente das fontes para o ambiente, como os poluentes veiculares, por geração de energia, das indústrias ou do transporte (MMA, Brasil; Shen *et al*, 2024) e secundários são aqueles gerados a partir de reações químicas entre os poluentes atmosféricos (Lei 14850, Brasil).

Para que a poluição possa ser mitigada é indispensável considerar as fontes pelas quais é emitida, pois dessa forma é possível propor medidas que atinjam o objetivo de diminuir a emissão por aquela fonte (Filippova, Mariia *et al*, 2025). Dentre as especificações existem as fontes fixas ou estacionárias que ocupam um espaço e área delimitados e podem ser caracterizadas por indústrias de mineração, de cosméticos ou alimentícias (MMA; Brasil, 2025).

Outra classificação são as fontes móveis que constituem os equipamentos móveis que emitem poluição, como os automóveis. Existem ainda fontes difusas, que podem dispersar seus poluentes em larga escala ou por longa extensão estando em pontos fixos ou móveis, nesses casos a poluição espalha-se, ocorrendo por todo o entorno como os aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto, queima de biomassa e queimadas que emitem poluentes com diferentes granulometrias.

As principais fontes poluidoras de acordo com o Instituto Nacional de Câncer (INCA, 2023) advém de diversos tipos de atividades sendo naturais como emissões vulcânicas e orgânicas de vegetais, setores industriais de siderurgia, química ou petróleo; da geração de energia por combustão e utilização da biomassa; e ações antrópicas a vegetação como incêndio e desmatamento.

A classificação de qualidade do ar possui 5 níveis dentre os quais estão: boa, moderada, ruim, muito ruim e péssima (Resolução CONAMA nº 506/2024). A resolução CONAMA 506/24 contém definições dos poluentes, qualidade do ar, e o material particulado 2,5 e 10 µg. Além disso, os valores de temperatura e monóxido de carbono são descritos no Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e a Política Nacional de Qualidade do Ar instituída e apresentada na conferência do clima Sistema nacional da qualidade do ar (CONAMA 506/24). A poluição atmosférica, trata-se de um fenômeno urbano e industrial.

A CETESB em seu relatório (2019-2024) estabelece que as estações fixas e móveis são responsáveis por monitorar e quantificar diariamente no boletim de qualidade do ar do site da companhia e os dados são classificados de acordo com os 5 níveis estabelecidos. Esses estão divididos em: N1 - qualidade boa, N2 - moderada; N3 - ruim; N4 - muito ruim; N5 - péssima (CETESB, 2025).

O índice é baseado na tabela de índice geral da CETESB e prevenção de riscos à saúde; em que o MP10 0 - 50 significa o N1, em que os padrões estão dentro dos definidos pela Organização Mundial da Saúde; o N2 tem significado para pessoas de grupos sensíveis e suscetíveis (crianças, idosos, pessoas com problemas respiratórios e cardíacos); o N3 a população pode apresentar sintomas de tosse seca, dores no nariz ou na garganta. N4 - toda a população pode apresentar sintomas de agravamento; N5 - toda a população apresenta sérios riscos à saúde.

O relatório de acompanhamento da qualidade do ar foi publicado em maio de 2025 pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudanças do Clima e a Universidade Federal de Santa Catarina (MMA; 2025), e a CETESB publicou o relatório de 2024 do estado de São Paulo no segundo semestre de 2025.

No Brasil, a resolução CONAMA Nº 506/2024 define um poluente atmosférico, os padrões e o índice de qualidade do ar, o qual é calculado como parte do processo de monitoramento ambiental. Ademais, estabelece os potenciais efeitos à saúde, levando em consideração as condições médias de temperatura e pressão, assim como as etapas e os pontos de avaliação considerados ao longo do ano.



Os padrões estabelecidos estão divididos em quatro pontos, nos quais a resolução determina os anos em que os limites devem ser cumpridos, conforme a seguinte ordem: PI-1 até 31 de dezembro de 2024; PI-2 a partir de 1º de janeiro de 2025; PI-3 a partir de 1º de janeiro de 2033; PI-4 a partir de 1º de janeiro de 2044. Dessa forma, em cada um dos pontos, os poluentes devem ser monitorados continuamente, garantindo que os novos parâmetros sejam respeitados e buscando, a cada década, uma melhoria contínua na qualidade do ar (CONAMA 506/2024).

Na China, um dos poluentes mais significativos são decorrentes da queima do carvão. Um plano de ação para a melhoria da qualidade do ar na China, de dezembro de 2023 possui como objetivo uma melhoria contínua na qualidade do ar, baseada para redução de emissão do carbono, redução da emissão de partículas finas material particulado de 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>), redução de poluição, expansão verde, redução do óxido de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (VOCs).

Alguns setores industriais, como o de siderurgia, têm restrições aprovadas em processos que emitem grandes quantidades de gases de efeito estufa, além de promover a substituição do uso do carvão, com o intuito de buscar o desenvolvimento de energia limpa. Os padrões de qualidade do ar da China (Governo da China) também contém limites para Benzo(a)pireno e outros poluentes orgânicos. Os padrões são classificados em 2 classes: 1 e 2 dos quais a classe 1 refere-se às regiões especiais como parques nacionais, enquanto os de classe 2 correspondem à área urbana e industrial, os níveis das classes são muito distintos quanto aos limites estabelecidos.

A Diretiva nº 2024/2881 da União Europeia, de 23 de outubro de 2024, trata da qualidade do ar ambiente na Europa. O documento estabelece metas claras para a redução dos impactos da poluição atmosférica, como o compromisso de diminuir em 55% até 2030 os efeitos da poluição sobre a saúde humana e em 25% sobre os ecossistemas ameaçados pela perda de biodiversidade.

Está alinhado com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) sobre qualidade do ar e especifica as disposições aplicáveis em caso de descumprimento da diretiva. Além disso, detalha as consequências da poluição

atmosférica para a saúde humana, enfatizando que os riscos são maiores para populações socioeconomicamente vulneráveis.

Existem diferentes sensores feitos com arduino, em algumas soluções utilizadas são filtros de carbono, existe um banco de dados alimentado através de uma rede de sensores de arduino na universidade do Arizona, responsável por monitorar níveis de MP<sub>2,5</sub>. O *Purple Air*s funciona com uma placa de arduino e um portal interativo é responsável por compilar os dados mensurados por esses sensores, públicos e acessados em tempo real no site da Universidade *Sensors at University of Arizona Network (SUNet)*.

A implementação de sensores não oficiais permite que os poluentes emitidos sejam contabilizados em diferentes regiões. Os aerossóis com dispersão e alcance prolongado por vezes não são contabilizados pelas fontes oficiais, enquanto um maior número de pontos de monitoramento permite inferir resultados com maior confiabilidade.

As medidas de implementação nas regulações exigem análise mais rigorosas e dos riscos quanto às patologias desencadeadas em razão dessas emissões. É essencial compreender quais são os poluentes, em que quantidade estão, o alcance, a dispersão e a recepção àqueles afetados por tais condições e acometidos por doenças cardiorrespiratórias.

Nos Estados Unidos, o ozônio troposférico e o MP<sub>2,5</sub> são os poluentes em maior quantidade, os incêndios, mudanças climáticas e crescimento urbano têm aumentado a emissão de partículas finas (EPA, 2025).

De modo geral, na legislação dos Estados Unidos, Environmental Protection Agency (EPA) existe um projeto de sensoriamento acessível intitulado *Enhanced Air Sensor Guidebook*, que constitui um modelo menos robusto que as redes de monitoramento, mas que permite identificar os poluentes em maior número de locais. O sensor consiste em controle por celular, Wi-Fi ou mobile, permitindo o monitoramento de outros locais com casas e indústrias (Clements *et al*, 2022). É uma tecnologia promissora por localizar-se em diversas áreas, considerando os aspectos de emissão, dispersão e recepção dos poluentes.

Na Índia, as principais fontes de poluição atmosférica incluem a queima do carvão, atividades industriais, emissões veiculares e agrícolas. Os poluentes são material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ), o dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e o ozônio troposférico ( $O_3$ ), sendo o  $PM_{2.5}$  considerado o contaminante mais preocupante em razão dos seus graves impactos sobre a saúde humana (IQAir, 2025).

Enquanto isso, os padrões exigidos pela *Central Pollution Control Board* (CPCB) do Ministério Ambiental, florestal e de mudanças climáticas do Governo da Índia estabelecem padrões em novembro de 2009 e mesmo desatualizados possuem limites que condizem com as legislações atualizadas dos demais países da pesquisa. No entanto, os dados reais de poluição de Déhli, Índia ultrapassam de modo significativo esses limites, como exemplificado na figura 13 que compara as emissões de Déhli com os padrões intermediários da resolução Brasileira CONAMA 506/24.

### **3.2 Métodos e técnicas oficiais para monitoramento da qualidade do ar**

Nas redes de monitoramento automático são monitorados 8 parâmetros: partículas inaláveis finas ( $MP_{2.5}$ ), partículas inaláveis ( $MP_{10}$ ), dióxido de enxofre; óxido de nitrogênio, monóxido de carbono, ozônio, benzeno/tolueno, enxofre reduzido total. Os métodos físico-químicos analíticos utilizados são respectivamente: radiação beta, fluorescência de pulso (UV), quimiluminescência, infravermelho não dispersivo (GFC), ultravioleta, cromatografia gasosa por fotoionização (PID), oxidação térmica - fluorescência de pulso (UV). Atualmente, outros métodos podem ter sido incorporados ao monitoramento além dos citados.

Enquanto nas redes manuais além dos gases anteriormente citados também são monitoradas as partículas totais em suspensão (PTS), fumaça (FMC), acetaldeído/formaldeído. O método empregado difere quanto ao método gravimétrico, as impactações ciclone virtual, ciclone, cromatografia iônica e gasosa acoplada ao espectrômetro de massas.

No Brasil, existem estações de monitoramento manuais e automáticas para a medição da emissão de gases poluentes. Nas redes manuais de monitoramento da

CETESB, as informações são coletadas em campo e analisadas no laboratório. As estações automáticas estão acopladas a computadores que recebem as informações de forma ininterrupta e é divulgado um boletim diário de qualidade do ar.

Para reconhecimento dos poluentes nesse tipo de estação, cada parâmetro possui um método específico para a medição. As partículas inaláveis e inaláveis finas são medidas por radiação beta, enquanto o dióxido de enxofre é medido por fluorescência de pulso (ultravioleta), os óxidos de nitrogênio através da quimiluminescência, o monóxido de carbono por meio de infravermelho não-dispersivo e o ozônio por ultravioleta (CETESB, 2009). As medições são realizadas conforme as descrições dos métodos analíticos:

No método analítico para material particulado com granulometria de 2,5µm ou 10µm (absorção por radiação beta) são utilizados filtros em que o MP é coletado em papel filtro, e o material particulado é posteriormente irradiado com os raios beta, então a intensidade dos raios que atravessam o filtro é medida. No processo, os elétrons em alta velocidade são ejetados por decaimento dos núcleos atômicos estáveis.

Quando atravessam a substância (MP) eles colidem com os átomos da molécula, e ocorre a ionização e excitação dos elétrons. A absorção dos raios beta emite ondas eletromagnéticas que resultam na mudança de órbita e na atenuação da intensidade proporcional à massa, essa corresponde a espessura da substância que a atravessa (Horiba, 2025). A Equação 1 descreve a medição:

Eq 1.  $X_m = \ln(I_0/I)/\mu_m$ , em que:

$X_m$ : Massa de material particulado ambiente no filtro;  $I$ : Intensidade dos raios beta que passam pelo filtro e pelo material particulado ambiente coletado;  $I_0$ : Intensidade dos raios beta que passam apenas pelo filtro;  $\mu_m$ : Coeficiente de absorção da massa.

Enquanto para a medição de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) a técnica utilizada é a fluorescência por pulso (ultravioleta) em que a amostra de ar passa pela célula de medição e é irradiada por luz ultravioleta, gera-se a curva de calibração

com gases certificados e com base nela a função que associa a concentração injetada e a fluorescência medida.

As etapas do procedimento primeiro utilizam o gás padrão dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e um regulador da pressão para que todo o ar residual seja retirado, após verificar o vazamento no sistema, calcula-se pela fórmula que contém a vazão corrigida; a vazão medida; a pressão medida em milímetros de mercúrio (mmHg) e a temperatura em graus celsius. No início do processo o gás é injetado e ajustado o fluxo de ar correspondente, o controle é ajustado na curva padrão (MMA, 2019).

A concentração de  $\text{SO}_2$  é calculada por meio da equação da reta obtida por regressão linear (Eq 2); Equação 2.  $[\text{SO}_2] = C \cdot (Q_p/Q_t)$ ; C: Concentração padrão do gás ( $\text{SO}_2$ );  $Q_p$ : Vazão do gás padrão;  $Q_t$ : Vazão total de todos os gases poluentes.

Quanto ao processo empregado na medição de dióxido de carbono é utilizada a quimiluminescência que consiste em reações químicas que emitem luz. Em uma reação química, a energia de excitação em um elétron emite luz ao retornar para o seu estado fundamental, então a reação resultante passa a ter a energia de emissão que foi emitida ao voltar para o estado inicial da reação. Dessa forma, na medição fotométrica a intensidade da luz e comprimentos de onda superiores a 600 nanômetros utilizam um conversor térmico.

Em seguida, a luz é transmitida por um filtro óptico e detectada por um fotorreceptor que mede a concentração do poluente, o gás emite luz em um comprimento de onda específico a cada um dos poluentes. Nesse método ocorre a oxidação do componente medido.

A análise das emissões de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) é comumente efetuada por meio da Técnica de Infravermelho Não Dispersivo (NDIR). Neste método, a radiação infravermelha é transmitida através de uma célula de amostra contendo o gás a ser investigado, e a absorção resultante é quantificada.

O princípio fundamental está na absorção de radiação infravermelha em um comprimento de onda específico. Um sensor incorpora uma abertura para a entrada da amostra gasosa acoplada a detectores que medem a intensidade da radiação, e uma saída para o fluxo do gás. Depois, o sistema utiliza filtros ópticos para

selecionar a emissão de luz em comprimentos de onda específicos, otimizados para a detecção do gás alvo.

Dentre os gases monitorados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), essas são as técnicas empregadas nas redes de monitoramento automáticas. Nas redes de monitoramento manual, a amostra é levada ao laboratório para a análise e os métodos empregados são gravimétrico, amostrador de grandes volumes acoplados a um separador inercial, impactação, cromatografia iônica, amostrador passivo e refletância e utilizam processos de filtração (CETESB; INPE, 2012).

### **3.3 Bioindicadores vegetais de poluição atmosférica: conceito, importância ambiental, principais parâmetros e alterações morfofisiológicas**

Os vegetais são responsáveis por filtrar o ar (ONU, 2019) pois absorvem os poluentes de forma facilitada. As espécies possuem diferentes sensibilidades a depender da substância que são expostas e sua concentração, além de algumas serem mais suscetíveis a sua absorção. Quando existe o contato entre os gases poluentes e a planta, pode ocorrer fitotoxicidade e cada poluente adentra os tecidos vegetais de uma forma específica (CETESB, 2025).

Um estudo com *Ichornea sidifolia*, *Casearia sylvestris*, *Guarea macrophylla* e *Machaerium nyctitans* sugere que a forma e morfologia do vegetal é determinante quanto às alterações causadas, ao passo que em espécies com a estrutura do mesófilo mais compacta, a modificação ocorre em menor escala (Araújo *et al*, 2025) e pode afetar também a ação de metabólitos e compostos orgânicos voláteis na ação antioxidante.

Os vegetais são mais sensíveis às alterações ambientais do que os seres humanos, uma vez que são filtradores do ar e absorvem os poluentes durante os processos de transpiração e respiração através dos estômatos. Desse modo, podem ser utilizados como alerta da incidência/ocorrência de contaminação em uma área.

Existem três tipos de vegetais usados para o biomonitoramento como as macrófitas, líquens e as plantas terrestres. A diversidade encontrada nos líquens,

macrófitas é motivo para não ser considerada no estudo, pois nem todas as espécies de líquens estão catalogadas em Sorocaba e as macrófitas que são superficiais possuem estudos em locais específicos e não de modo geral no município. Portanto, na presente pesquisa, optou-se por utilizar um levantamento de espécies de plantas terrestres.

Diante das informações acima citadas, um estudo indicou que a exposição aos poluentes causa anormalidades nos processos de divisão celular das inflorescências em *Tradescantia pallida* var. *purpurea* quanto ao efeito de genotoxicidade perante aos processos de emissão do tráfego veicular (Schneider *et al*, 2024).

### **3.4 Principais doenças associadas aos poluentes ambientais**

A poluição compromete a integridade da cadeia produtiva que resulta no declínio do ecossistema. Sabe-se, segundo Saldiva (2022) que as doenças respiratórias e cardiovasculares são agravadas pela exposição da população às áreas associadas às atividades urbanas e industriais.

Os poluentes atmosféricos são constituídos por diferentes gases e cada um deles possui um efeito adverso à saúde humana. Os riscos associados à saúde podem ser exacerbados durante o período de gestação, pois quando são expostas a elevadas concentrações, o NO<sub>2</sub> pode interferir no desenvolvimento placentário e redução na formação dos vasos sanguíneos e inflamação (Hettfleisch *et al*, 2021).

Com o objetivo de compreender como as emissões de gases afetam a saúde, é imperativo associá-la ao caminho pelo qual as emissões se espalham, considerando a emissão, dispersão e recepção. Esses determinam o percurso de um poluente, devendo considerar também outros aspectos como a sazonalidade, o clima, a direção do vento e a pluma (*smog*) através da modelagem matemática que descreve a dispersão, transporte e quantidade dos poluentes. A dispersão ocorre no transporte e sofre ação de interferentes meteorológicos, onde encontra um receptor.

A correlação entre a emissão de poluentes atmosféricos e as patologias está relacionada aos índices de doenças cardiorrespiratórias. Na literatura, é demonstrado que o aumento dos níveis de poluição do ar acarreta em um

crescimento significativo na incidência dessas enfermidades. Exemplo disso, é o estudo em que a poluição do ar remodelou a expansão do vírus da COVID-19 na China. No entanto, muitas variáveis são consideradas ao relacionar uma doença viral aos níveis de material particulado, uma vez que essas evidências dependem das características epidemiológicas do vírus, potencial do impacto devido ao tempo de incubação do vírus, os testes e relatórios (He, Pan e Tanaka; 2025).

Um estudo que investigou a associação entre as internações hospitalares por doenças cardiovasculares e a exposição a poluentes atmosféricos, material particulado fino ( $MP_{2,5}$ ), ozônio ( $O_3$ ) e dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), identificou uma correlação significativa entre esses fatores. Os resultados indicaram que, mesmo em um curto período de exposição, um aumento nos níveis desses poluentes esteve associado a uma progressão de 3,28% nas taxas de internação por doenças cardiovasculares (Requia *et al*, 2023).

Quanto às doenças cardiovasculares associadas à poluição, a exposição prolongada ao carbono negro resultante das emissões veiculares é agravante da doença cardiovascular e insuficiência cardíaca associada a fibrose miocárdica, onde os poluentes são depositados no pulmão, causando uma retenção das partículas ultrafinas e carbonáceas na superfície pulmonar, e quando associados a comorbidades indicam maior suscetibilidade às patologias (Takano *et al*, 2024).

Problemas cardiovasculares como o infarto do miocárdio mostraram que a faixa etária dos entrevistados e a distância percorrida até clubes comunitários, centros esportivos e ciclovias foram fatores preponderantes para a ocorrência de infarto e ocorrência de diabetes e tabagismo (Leite *et al*, 2024). A mortalidade cardiovascular está associada aos incêndios florestais e o material particulado fino  $MP_{2,5}$  relaciona a concentração, resposta e exposição (Chen *et al*, 2021). Tais correlações são substanciais no estudo para que seja viável propor medidas de mitigação, somente conhecendo suas consequências é possível combatê-las.

Ademais, condições socioeconômicas e habitacionais demonstram relação indissociável às patologias induzidas por poluentes atmosféricos, uma vez que o tempo de exposição da população a ambientes urbanos, particularmente durante o deslocamento do trabalhador através de transporte público, expõe um fator relevante



de vulnerabilidade às intempéries ambientais. Os indivíduos em situação de rua estão sujeitos a condições de exposição contínua e crônica, com consequências deletérias para sua saúde (Habermann *et al*, 2014).

Outro estudo corrobora que a exposição ao material particulado pode causar maior suscetibilidade aos agentes microbianos causadores de infecções bacterianas. Essa é mais uma evidência de exposição ao poluente induz uma resposta inflamatória e interfere no sistema imunológico, acarretando nas ações dos linfócitos e leucócitos no tecido responsável pelas trocas gasosas no pulmão, o parênquima pulmonar (Costa *et al*, 2022).

Àqueles que possuem comorbidades preexistentes nos sistemas respiratório ou cardiovascular podem apresentar exacerbação de suas condições. Os grupos populacionais como idosos, crianças e gestantes demonstram maior vulnerabilidade aos efeitos da poluição atmosférica (Vormittag *et al*, 2021).

O material particulado inclui as emissões decorrentes de combustão e pela interação e transformação química na atmosfera, resultando em novos elementos. A taxa de toxicidade está associada ao tempo de exposição e concentração do poluente, os estudos que evidenciam as doenças cardiorrespiratórias que sucumbem com a poluição atmosférica proveniente de atividades antropogênicas ou naturais, mas o estado busca relacioná-las conforme a legislação atual (2024) e os padrões de OMS, que descrevem como esses poluentes podem afetar a saúde.

Trata-se de uma questão para além do viés ambiental e epidemiológico, uma vez que, condições de suscetibilidade podem ser determinantes nos indicadores de impactos à saúde e qualidade de vida. Existe um ramo da epidemiologia que estuda as relações entre as doenças crônicas e o contexto ambiental. Portanto, a relevância advém de que é possível associar a taxa de mortalidade às concentrações do poluente (Barreto, 2017).

Outra doença respiratória é antracose pleural que é capaz de fornecer informações como um indicador de poluição do ar, uma vez que, constitui na deposição de partículas de carbono na superfície pulmonar - o que desencadeia a doença é a exposição ao carbono negro, emitida principalmente de automóveis e

escapamentos. Os diagnósticos foram realizados por meio de análise *post-mortem* dos pacientes, sendo fruto de autópsias (Saldiva, 2019).

Dentre os materiais particulados, o MP<sub>2,5</sub> possui efeitos mais graves, pois penetra na árvore traqueobrônquica, chega aos alvéolos e induz o agravamento de doenças preexistentes. Ao atingir os alvéolos pulmonares pode ferir as paredes provocando comprometimento da função pulmonar, a circulação sanguínea e resposta imunológica atingindo linfócitos e causando inflamações, são descritas como alterações histopatológicas dos pulmões, afetam o tecido pulmonar (Costa *et al*, 2020; Kamigauti *et al*, 2021).

Entre as doenças respiratórias mais afetadas por exposição à poluentes estão as Doenças pulmonares Obstrutivas Crônicas (DPOC) como o enfisema pulmonar, nessa patologia tóxica afeta a região distal do pulmão, danifica os alvéolos e dificulta a expiração. Outra doença que é parte da DPOC é a bronquite crônica, ao passo que há interferência dos fatores externos dos tóxicos.

Um experimento simulando condições atmosféricas dentro dos padrões estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde realizou testes em camundongos submetidos à análise por autópsia. Os roedores foram expostos a poluentes e houve a medição da concentração dos elementos com 2 grupos controle que receberam o ar filtrado e outros 2 o ar com partículas de exaustão de diesel. A análise química foi realizada por fluorescência de raio X e como resultado houve o aumento no número de células inflamatórias no grupo de teste e na apoptose, ainda que a avaliação mecânica respiratória não tenha demonstrado conclusões tão significativas (Moreira *et al*, 2020).

Diante do exposto, evidencia-se na literatura, a relação direta entre o comprometimento biológico diante da exposição aos poluentes atmosféricos. Porém, é escasso na literatura estudos sobre a potencial relação entre indicadores biológicos vegetais com a saúde humana em grandes centros urbanos. A literatura evidencia que a ausência de vegetação pode trazer uma série de implicações, mas não relaciona a qualidade morfofisiológica do vegetal com as questões de saúde humana, havendo uma lacuna a ser preenchida. Nesse sentido a presente pesquisa

por meio da análise literária e consulta a banco de dados, pretende fazer tal relação e propor um índice como ferramenta de gestão integrada.

#### **4. METODOLOGIA**

Trata-se de um estudo de abordagem quali-quantitativa, de caráter documental, bibliográfico e ecológico observacional, desenvolvido com o objetivo de avaliar a relação entre poluição atmosférica, indicadores de saúde pública e potenciais bioindicadores vegetais na cidade de Sorocaba-SP. A pesquisa integrou análise de legislações ambientais nacionais e internacionais, levantamento bibliográfico sobre bioindicadores vegetais, dados de qualidade do ar provenientes da CETESB e indicadores epidemiológicos obtidos em bases governamentais. Para avaliação estatística das associações entre poluentes atmosféricos e agravos à saúde foram utilizados modelos lineares generalizados (GLM).

A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: etapa 1 - análise comparativa das legislações ambientais relacionadas à qualidade do ar; etapa 2 levantamento e avaliação de espécies vegetais com potencial bioindicador; etapa 3-análise de indicadores epidemiológicos relacionados às doenças cardiorrespiratórias; e etapa 4 - avaliação estatística das associações entre poluentes atmosféricos e agravos à saúde.

##### **4.1 Etapa 1 – Análise das legislações ambientais e indicadores de qualidade do ar** **Legislação ambiental para poluição atmosférica no Brasil e no mundo**

Esta etapa teve como finalidade analisar comparativamente as legislações e diretrizes relacionadas à qualidade do ar no Brasil e em outros países, bem como avaliar os parâmetros de monitoramento atmosférico utilizados para controle dos poluentes ambientais.

Para compreensão da regulamentação de gases e materiais particulados, de modo a prevenir impactos na saúde ambiental, no Brasil e no mundo, foram utilizadas legislações brasileiras, da União Europeia, da China e da Índia (*Ambient Air Quality Status of the Country*, 2023).

O objetivo foi comparar os tipos de poluentes e limites permitidos regulamentados para posteriormente comparar com dados de saúde. Considerando-se que o foco da pesquisa é a cidade de Sorocaba, no Estado de São Paulo, utilizam-se os dados de relatórios ambientais, como os anuais da CETESB, sobre a qualidade do ar e os relatórios oficiais dos departamentos de meio ambiente e mudanças climáticas dos demais locais utilizados como verificação da pesquisa para confrontar com as legislações.

A coleta de dados para esta pesquisa foi realizada mediante a análise de documentos e informações disponibilizadas por agências e convenções internacionais, bem como por órgãos do governo local, legislações brasileiras, da União Europeia, da China e da Índia (*Ambient Air Quality Status of the Country* - 2023). Essa abordagem metodológica foi adotada com o objetivo de assegurar a acurácia dos dados referentes a cada país investigado. O período utilizado como filtro para as legislações dos órgãos governamentais foram os últimos cinco anos.

A consulta a fontes primárias de organizações internacionais e governamentais buscou informações padronizadas e comparáveis por meio da pesquisa nas agências e convenções internacionais do governo local, em busca de uma maior confiabilidade nos dados de cada país. Para tanto, os respectivos relatórios de cada um dos países utilizados como ferramenta de comparação foram correlacionados aos índices e limites impostos pela regulamentação brasileira, buscando contemplar o assunto de modo a atestar a rigorosidade e intersecção nos limites estabelecidos quando confrontados às emissões em cada país.

#### **4.2 Etapa 2 – Levantamento e avaliação de espécies vegetais com potencial bioindicador de poluição atmosférica na cidade de Sorocaba-SP**

Esta etapa teve como finalidade identificar espécies vegetais presentes na cidade de Sorocaba com potencial de utilização como bioindicadoras de poluição atmosférica, bem como avaliar as alterações morfofisiológicas descritas na literatura científica.

A primeira etapa para a identificação de espécies com potencial para atuarem como bioindicadoras de poluição atmosférica foi a realização de um levantamento de todas as espécies da cidade de Sorocaba. Para a realização do levantamento foi solicitada às Secretarias do Meio Ambiente da cidade via e-mail a disponibilização de uma lista das espécies vegetais do município de Sorocaba.

Em seguida, um levantamento bibliográfico (2020 - 2025) foi realizado com o objetivo de selecionar as espécies com maior potencial para atuarem como bioindicadoras dentre as espécies na região de estudo. Para tal, utilizou-se o Google Acadêmico e o *Science Direct*, buscando como palavras-chaves os nomes científicos das espécies listadas pelas Secretarias do Meio Ambiente pesquisadas em conjunto com o termo “*bioindicator*” para identificar aquelas que possuem estudos sobre seu potencial como bioindicadores.

Os critérios de exclusão foram estabelecidos com base nos seguintes aspectos: estudos que abordavam exclusivamente contaminantes herbicidas e biocidas ou que se restringiam à contaminação do solo, desconsiderando aqueles que não tinham a poluição atmosférica como principal foco. As espécies que atenderam aos critérios de seleção foram incluídas na revisão bibliográfica para um estudo detalhado das suas alterações morfofisiológicas resultantes da interação com os poluentes atmosféricos.

Foram adotados os seguintes critérios de seleção: a espécie apresenta mudanças morfofisiológicas em resposta a interação com poluentes atmosféricos; a espécie possui ocorrência contínua ao longo de todo o ano - não perene e a baixa suscetibilidade às variações climáticas sazonais.

#### **4.2.1 Estudo das alterações morfofisiológicas apresentadas pelas espécies vegetais selecionadas**

Para o levantamento das principais alterações morfofisiológicas causadas pelos poluentes atmosféricos nas espécies vegetais selecionadas foi realizada uma análise da literatura compreendendo os últimos cinco anos (2020-2025). Esta

revisão abrangeu as seguintes bases de dados: *Web of Science*, *Science Direct* e Google Acadêmico.

Os descritores utilizados nesta pesquisa são compostos pelos nomes científicos das espécies selecionadas combinados com as seguintes palavras-chave: *air pollution effects*; *pollution-induced morphophysiological changes*; *stress-induced morphophysiological changes*. Além disso, foram consultados nos bancos de dados fornecidos pelo levantamento municipal fornecidos pela Secretaria do Meio Ambiente da cidade.

Após as buscas de cada uma das espécies para que o estudo fosse realizado, as espécies encontradas com estudos relacionados com bioindicadores foram selecionadas resultando num total de 52 espécies diante as 457 inicialmente pesquisadas. Para tanto utilizou-se dos nomes científicos e o operador *booleano* “and” seguido de “*bioindicator*” e após a seleção dessas espécies a análise dos artigos encontrados deu-se através da observação das descrições de alterações morfofisiológicas e anatômicas nas espécies.

No entanto, tais análises realizadas abrangem todo o Brasil, uma vez que não encontrou-se na literatura artigos que vinculasse as espécies somente a sua ocorrência na cidade estudada. Por esse motivos, fez-se necessária uma pesquisa aprofundada das condições de crescimento de cada um dos vegetais analisados, ao passo que as condições de fenologia, floração, temperatura e inibição de crescimento são indissociáveis do processo de desenvolvimento botânico e são somente alguns dos diferentes interferentes, além daqueles metabólicos que interferem na condução de seiva bruta e elaborada na flora (Tabela 1):

**Tabela 1.** Sazonalidade de cada uma das espécies bioindicadoras (EMBRAPA, 2006).

| Espécie vegetal                            | Temp Min | Máx | Floração          | Frutificação       | Clima                     |   |
|--------------------------------------------|----------|-----|-------------------|--------------------|---------------------------|---|
| <i>Allophylus edulis</i>                   | 25       | 30  | julho setembro    | - outubro-dezembro | subtropical úmido         |   |
| <i>Artocarpus heterophyllus</i>            | 25       | 30  | dezembro março    | - dezembro-abril   | quente úmido              | e |
| <i>Baccharis dracunculifolia</i>           | 18       | 28  | primavera verão   | - outono - inverno | úmida                     |   |
| <i>Bauhinia forficata</i>                  | 16       | 27  | chuvosa           | transição seca     | mais tropical subtropical | e |
| <i>Borreria capitata</i>                   | 20       | 30  | chuvosa           | chuvosa /seca      | semiárido tropical        | e |
| <i>Borreria verticillata</i>               | 20       | 30  | chuvosa           | chuvosa /seca      | semiárido tropical        | e |
| <i>Byrsonima basiloba</i>                  | 22       | 28  | outubro/dezembro  | novembro/março     | tropical semiárido        |   |
| <i>Campomanesia xanthocarpa</i>            | 20       | 28  | outubro/novembro  | novembro/março     | tropical                  |   |
| <i>Casearia sylvestris</i>                 | 18       | 28  | chuvosa           | transição seca     | chuva tropical            |   |
| <i>Cedrela fissilis</i>                    | 22       | 28  | setembro novembro | - novembro março   | - tropical subtropical    | / |
| <i>Ceiba speciosa</i>                      | 20       | 30  | novembro-janeiro  | janeiro - março    | tropical subtropical      | / |
| <i>Colubrina glandulosa/Colubrina rufa</i> | 20       | 30  | primavera         | outubro - janeiro  | tropical                  |   |

| <b>Espécie vegetal</b>               | <b>Temp Min</b> | <b>Máx</b> | <b>Floração</b>   | <b>Frutificação</b>  | <b>Clima</b>              |
|--------------------------------------|-----------------|------------|-------------------|----------------------|---------------------------|
| <i>Copaifera langsdorffii</i>        | 22              | 28         | setembro-dezembro | dezembro-março       | - tropical                |
| <i>Cordia americana</i>              | 20              | 30         | setembro-novembro | novembro-março       | - tropical                |
| <i>Croton floribundus</i>            | 20              | 28         | setembro-novembro | novembro-março       | - tropical                |
| <i>Cupania vernalis</i>              | 20              | 28         | setembro-dezembro | novembro-março       | - tropical                |
| <i>Cyperus rotundus</i> L.           | 28              | 30         | outubro-fevereiro | -                    | tropical                  |
| <i>Dendropanax cuneatus</i>          | 20              | 28         | outubro-dezembro  | - novembro-fevereiro | - tropical                |
| <i>Dodonaea viscosa</i>              | 20              | 30         | outubro-dezembro  | - novembro-março     | - tropical                |
| <i>Enterolobium contortisiliquum</i> | 22              | 28         | setembro-dezembro | novembro-março       | - tropical                |
| <i>Eriobotrya japonica</i>           | 15              | 25         | maio - julho      | outubro-novembro     | - temperado e subtropical |
| <i>Eryngium horridum</i>             | 20              | 28         | outubro-janeiro   | - fevereiro- abril   | tropical e subtropical    |
| <i>Eucalyptus</i> spp.               | 18              | 30         | junho-setembro    | - outubro-dezembro   | - tropical e subtropical  |
| <i>Eugenia dysenterica</i>           | 22              | 28         | outubro-dezembro  | - novembro-março     | - tropical e subtropical  |
| <i>Eugenia uniflora</i>              | 20              | 28         | outubro-janeiro   | - janeiro - março    | tropical e subtropical    |



| <b>Espécie vegetal</b>            | <b>Temp Min</b> | <b>Máx</b> | <b>Floração</b>      | <b>Frutificação</b>     | <b>Clima</b>             |
|-----------------------------------|-----------------|------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| <i>Gallesia integrifolia</i>      | 22              | 30         | setembro<br>dezembro | - novembro<br>fevereiro | - tropical               |
| <i>Guarea guidonia</i>            | 22              | 28         | setembro<br>novembro | e novembro<br>fevereiro | - tropical úmido         |
| <i>Guarea macrophylla</i>         | 22              | 28         | outubro<br>dezembro  | - dezembro<br>março     | - tropical úmido         |
| <i>Hancornia speciosa</i>         | 22              | 28         | novembro<br>janeiro  | - fevereiro - maio      | tropical e subtropical   |
| <i>Handroanthus chrysotrichus</i> | 20              | 30         | setembro<br>novembro | - novembro<br>janeiro   | - tropical e subtropical |
| <i>Hyptis suaveolens</i>          | 20              | 30         | novembro<br>janeiro  | - fevereiro - maio      | tropical                 |
| <i>Inga subnuda</i>               | 22              | 30         | novembro<br>janeiro  | - fevereiro - maio      | tropical                 |
| <i>Ipomoea cairica</i>            | 20              | 30         | outubro<br>janeiro   | - fevereiro<br>março    | - tropical               |
| <i>Lantana camara</i> L.          | 20              | 30         | setembro<br>dezembro | - novembro - abril      | tropical                 |
| <i>Leucaena leucocephala</i>      | 22              | 32         | janeiro - abril      | março<br>setembro       | - tropical               |
| <i>Machaerium nyctitans</i>       | 22              | 30         | novembro<br>janeiro  | - fevereiro - abril     | tropical                 |
| <i>Mangifera indica</i>           | 24              | 32         | agosto<br>outubro    | - outubro - janeiro     | tropical                 |
| <i>Megathyrsus maximus</i>        | 22              | 32         | novembro<br>março    | - janeiro<br>fevereiro  | - tropical               |

| <b>Espécie vegetal</b>      | <b>Temp Min</b> | <b>Máx</b> | <b>Floração</b>      | <b>Frutificação</b>     | <b>Clima</b> |
|-----------------------------|-----------------|------------|----------------------|-------------------------|--------------|
| Melia azedarach L.          | 18              | 28         | setembro<br>novembro | - dezembro<br>março     | - tropical   |
| Miconia albicans            | 22              | 28         | agosto<br>novembro   | - novembro<br>fevereiro | - tropical   |
| Oeceoclades maculata        | 22              | 30         | outubro<br>dezembro  | - dezembro              | tropical     |
| Palicourea marcgravii       | 22              | 30         | outubro<br>janeiro   | - fevereiro - abril     | tropical     |
| Parthenium hysterophorus L. | 20              | 30         | novembro<br>março    | - dezembro<br>maio      | - tropical   |
| Peltophorum dubium          | 20              | 30         | outubro<br>dezembro  | - janeiro - abril       | tropical     |
| Piptadenia gonoacantha      | 20              | 30         | novembro<br>janeiro  | - março - maio          | tropical     |
| Plathymenia reticulata.     | 22              | 28         | agosto<br>novembro   | - dezembro<br>fevereiro | - tropical   |
| Psidium guajava L.          | 22              | 30         | junho<br>setembro    | - outubro - janeiro     | tropical     |
| Psidium guineense Sw.       | 22              | 30         | junho - agosto       | agosto<br>dezembro      | - tropical   |
| Ricinus communis L.         | 20              | 30         | novembro<br>janeiro  | - dezembro<br>março     | - tropical   |
| Senecio brasiliensis        | 20              | 30         | outubro<br>dezembro  | - janeiro - março       | tropical     |
| Tecoma stans                | 20              | 30         | setembro<br>dezembro | - janeiro - abril       | tropical     |

| Espécie vegetal             | Temp Min | Máx | Floração            | Frutificação      | Clima    |
|-----------------------------|----------|-----|---------------------|-------------------|----------|
| <i>Tibouchina granulosa</i> | 20       | 25  | outubro<br>dezembro | - janeiro - março | tropical |

Fonte: autoria própria.

No entanto, ao pesquisar as espécies da cidade de Sorocaba que possuem estudos indicando seu potencial bioindicador na cidade surge uma lacuna preocupante. A busca nas bases de dados Science Direct retornou 50 artigos, dos quais 32 constituem estudos no ambiente aquático, outros 28 são terrestres mas, foram desconsiderados pois consideram interferentes agrotóxicos, e não de poluição do ar. De todos os artigos, apenas um deles tinha como local de estudo a cidade de Sorocaba e os vegetais estudados foram o ipê, pinus e sibipiruna (Caldana *et al*, 2023).

#### **4.3. Etapa 3 – Análise epidemiológica das doenças associadas à poluição atmosférica**

Esta etapa teve como finalidade avaliar a ocorrência de doenças respiratórias e cardiovasculares potencialmente associadas à exposição aos poluentes atmosféricos, utilizando dados epidemiológicos obtidos em bases governamentais oficiais.

A exposição aos poluentes atmosféricos está fortemente associada à incidência de problemas respiratórios e cardíacos, os quais podem ser agravados ou desencadeados por essa exposição. Os descritores utilizados para o estudo foram “*air pollution disease*”; “*cardiovascular+pollution*”; “*respiratory+air pollution*” nos bancos de dados *PubMed*, *BVS*, *Science Direct* e *Web of Science*.

Para realizar correlação entre os índices de poluição atmosférica da cidade estudada e a ocorrência de doenças respiratórias e cardiovasculares nessa cidade foram obtidos os dados de internações e óbitos das doenças respiratórias e

cardiovasculares através do DataSus, Agência Nacional de Saúde e as Secretarias de Saúde locais no período entre 2019-2024. Os dados epidemiológicos foram obtidos em diferentes bases governamentais com o objetivo de ampliar a abrangência e confiabilidade das informações analisadas.

Os dados relacionados aos índices de poluição atmosférica foram retirados dos relatórios da CETESB, da legislação e dos padrões exigidos pelas leis governamentais, com ênfase na lei brasileira e comparada às leis, emissões e aos índices contidos na Organização Mundial da Saúde para fins de comparação. Os índices de poluição atmosférica encontrados foram avaliados segundo os parâmetros estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS), o decreto estadual de qualidade do ar, a resolução CONAMA 491/2018 e 506/24 de 05 de julho de 2024.

Como forma de complemento aos dados dos demais bancos, foi utilizada a plataforma Vigiar da Secretaria da Vigilância em Saúde e Meio Ambiente, lançada em 16 de junho de 2024 na conferência de mudanças climáticas e do clima, que compara a ocorrência de doenças e a presença do material particulado.

#### **4.4. Etapa 4 - Análise estatística dos dados**

Esta etapa teve como finalidade investigar possíveis associações entre os níveis de poluentes atmosféricos e os indicadores epidemiológicos analisados, por meio da aplicação de modelos lineares generalizados (GLM).

Para as análises de correlação multivariada foram utilizados modelos lineares generalizados (GLM) com distribuição gaussiana com função “identity”. Foram usadas como variáveis respostas taxa de internação por problema circulatório, taxa de mortalidade por problema respiratório, taxa de mortalidade por problema respiratório e taxa de mortalidade por problema circulatório para a faixa etária acima de 60 anos e apenas taxa de internação por problemas respiratórios para faixa etária abaixo de 4 anos de idade.

Como variáveis explanatórias foram utilizados concentração mensal de NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> e MP<sub>10</sub>, nos anos 2020 a 2024 correspondentes as letras de A a E e meses (janeiro a dezembro) (variáveis categóricas - não são números, são nomes).

Antes da realização das correlações, as variáveis explanatórias numéricas foram padronizadas utilizando score Z. Dentro de cada modelo a significância ( $P \leq 0,05$ ) de cada variável foi averiguada com uso do teste Z, que testa se o valor estimado de cada parâmetro diferiu significativamente de zero (0). O software utilizado foi o *RStudio* versão 3.2.1.

## **5 RESULTADOS**

### **5.1 Os parâmetros para a qualidade do ar e suas relações com os níveis de poluição emitidos**

Observou-se limitação na representatividade espacial das redes de monitoramento atmosférico da cidade de Sorocaba, considerando a existência de apenas duas estações para um município com elevada extensão territorial e densidade populacional (757.459 habitantes e extensão territorial de 449872 km<sup>2</sup>, IBGE, 2024).

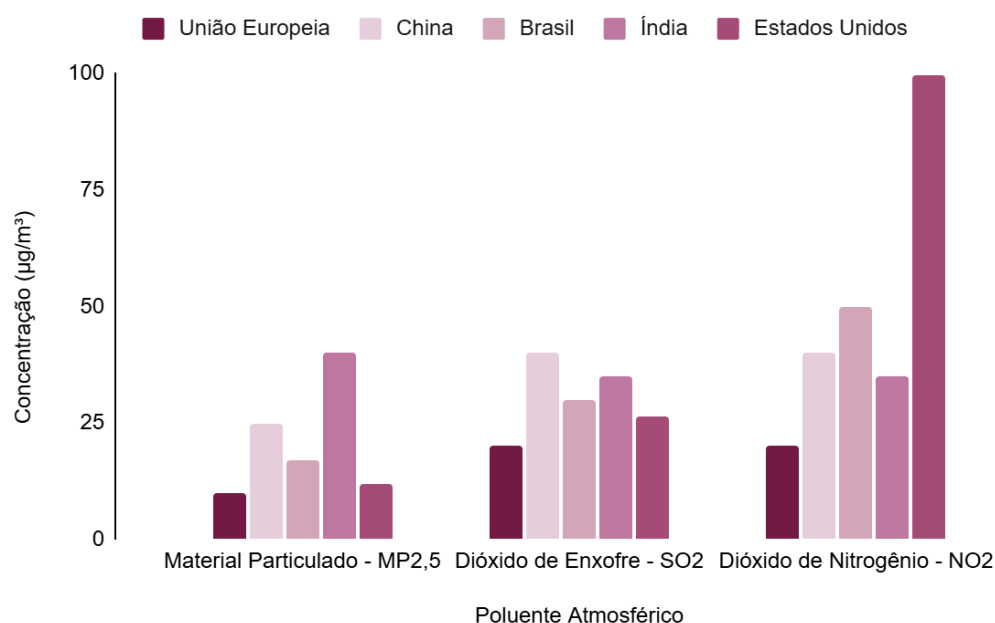
Além disso, descreve os riscos da exposição a cada um dos poluentes regulamentados e os impactos sobre os ecossistemas naturais. São descritas também, diretrizes para avaliação e monitoramento da qualidade do ar, com planos de ação que incluem medidas de curto prazo e mecanismos de cooperação entre os Estados-membros sempre que os valores ultrapassem os limites estabelecidos.

De acordo com a diretiva da União Europeia realizada a cada quinquênio (5 anos), a Comissão Europeia realiza um exame periódico, reavaliando as normas com base em descobertas científicas e novas orientações sobre qualidade do ar. A diretiva também define os critérios para medição dos poluentes em pontos fixos e os limites de avaliação para cada zona regulamentada.

De acordo com a figura 2, abaixo, é possível inferir que a legislação mais restritiva é a da União Europeia, que em todos os poluentes permite os menores níveis de poluição, restringindo mais às emissões. Algumas legislações não impõem limites a alguns poluentes e outras acrescentam alguns elementos mais específicos. Diferentemente da Resolução CONAMA 506/24, a diretiva da União Europeia define limites para Arsênio, Níquel, Benzeno e Benzo(a)pireno.

Por fim, a pesquisa reconhece a importância dos bioindicadores de poluição como ferramentas essenciais para o monitoramento ambiental, contribuindo para a formulação de políticas públicas mais eficazes e para a preservação da biodiversidade. Com base na análise comparativa no (figura 2) referente ao MP<sub>10</sub>, conclui-se que a União Europeia estabelece os limites inferiores, enquanto a China, especificamente na classe 2, define os limites superiores. Essa mesma tendência se verifica em relação ao MP<sub>2,5</sub>. No gráfico foram utilizadas as médias anuais das legislações e a restrição dos poluentes analisados deve-se a ausência de informações de alguns gases, os poluentes que são semelhantes em ambas legislações estão representados no (Figura 2).

**Figura 2.** Padrões estabelecidos para os poluentes atmosféricos na União Europeia, China, Índia, Estados Unidos e Brasil.



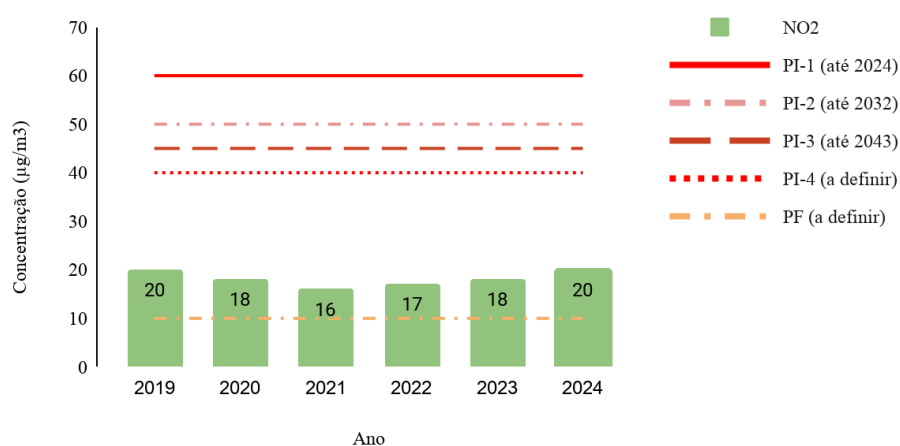
Fonte: Autoria própria.

Para comparar os índices de emissão de poluentes com os padrões estabelecidos, foram consideradas as diretrizes da Resolução CONAMA 506/24 e os relatórios da CETESB. Sorocaba possui apenas uma rede de monitoramento automática localizada na Rua Nhonhô Pires, 260; Vila Lucy - Sorocaba com o início de operação em 28/01/2000 que monitora MP<sub>10</sub>, óxido nítrico, dióxido de nitrogênio, ozônio e NO<sub>x</sub> e uma manual na Praça Dr. Arthur Fajardo, s/nº Centro - Sorocaba; com início da operação em 02/07/1986 e que monitora os parâmetros de fumaça. As

informações referentes às redes de monitoramento estão no QUALAR - Sistema de Informações de qualidade do ar.

As estações de monitoramento da cidade de Sorocaba realizam medições de NO, fumaça e MP<sub>10</sub>. Para os demais poluentes, os valores apresentados no relatório estão expressos em 1000 toneladas por ano (1000 ton/ano). No entanto, devido à ausência de informações sobre a área específica analisada para a construção desses índices, não é possível estabelecer uma relação direta com os dados disponíveis.

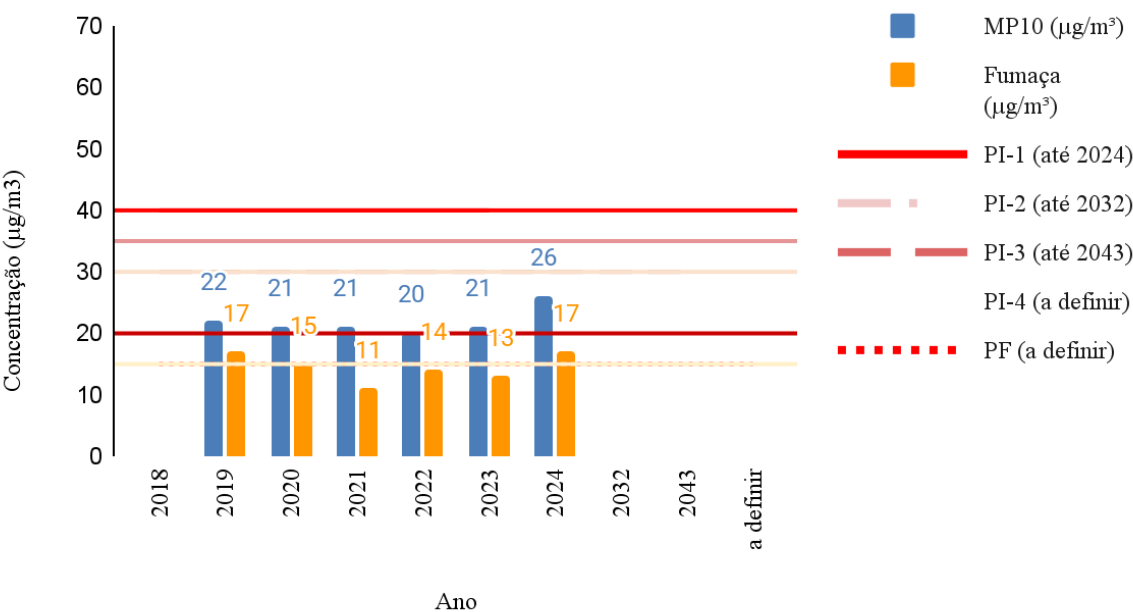
**Figura 3.** Concentração de emissão de dióxido de nitrogênio e padrões CONAMA na cidade de Sorocaba



Fonte: do próprio autor.

A figura 3 que apresenta os níveis de emissão de dióxido de nitrogênio, quando comparado aos padrões estabelecidos, revela uma discrepância significativa. No entanto, os valores observados permanecem dentro dos limites definidos pela resolução vigente.

**Figura 4.** Concentração de emissão de MP10, fumaça e padrões CONAMA na cidade de Sorocaba.



Fonte: autoria própria.

Por outro lado, ao comparar os níveis de emissão de material particulado e fumaça com os padrões estabelecidos (Figura 4), observa-se que o Padrão Intermediário 4 e o Padrão Final apresentam limites inferiores às emissões atuais. No entanto, conforme a Resolução CONAMA 506/24, esses padrões entrarão em vigor somente a partir de 2043.

A análise dos padrões intermediários e das emissões de poluentes na cidade de Sorocaba revela uma diferença significativa entre o padrão vigente (especificamente, o padrão intermediário 2) e os níveis de emissão observados no período de 2019 a 2024. A análise comparativa entre os níveis de emissão atmosférica observados em Sorocaba e os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 506/24 demonstrou que os valores registrados permaneceram dentro dos limites vigentes durante o período avaliado.

Para avaliar se os resultados observados em outras cidades do estado seguem a mesma tendência, foram comparados os valores de quatro dos doze pontos de monitoramento automático da cidade de São Paulo, utilizando os mesmos



parâmetros estabelecidos. Os pontos de monitoramento analisados foram Ibirapuera, Congonhas, Pinheiros e Marginal Tietê.

Dentre os pontos analisados, o gráfico abaixo apresenta os dados da Marginal Tietê, local com o maior índice de emissão. Quanto ao padrão Intermediário 1, as emissões de dióxido de nitrogênio (figura 5) já ultrapassam os limites estabelecidos. Os dados obtidos para a Marginal Tietê demonstraram concentrações de dióxido de nitrogênio superiores aos limites estabelecidos pelo padrão intermediário 1.

**Figura 5.** Concentração de emissão de dióxido de nitrogênio na Marginal Tietê (São Paulo).



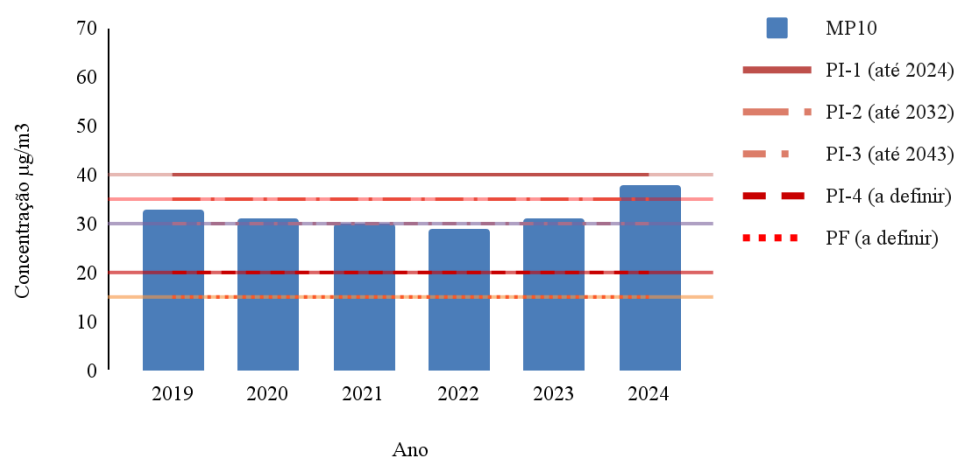
Fonte: Autoria própria.

Também foram comparados os índices de material particulado (MP<sub>10</sub>) (figura 6), os quais atualmente estão dentro dos limites estabelecidos. No entanto, com a entrada em vigor do Padrão Intermediário 1, as emissões já ultrapassaram o limite permitido. Diante desse cenário, torna-se essencial a implementação de ações públicas voltadas à redução dessas emissões, a fim de que, os níveis do poluente estejam inferiores aos registrados atualmente.

No que se refere a cidade de São Paulo existem 22 pontos de monitoramento automáticos, dos quais 18 monitoram algum tipo de poluente e outros 4 estão

desativados ou nenhum dos padrões é monitorado. Quanto ao monitoramento manual há 12 pontos e apenas 7 monitoram algum poluente (QUALAR, 2025).

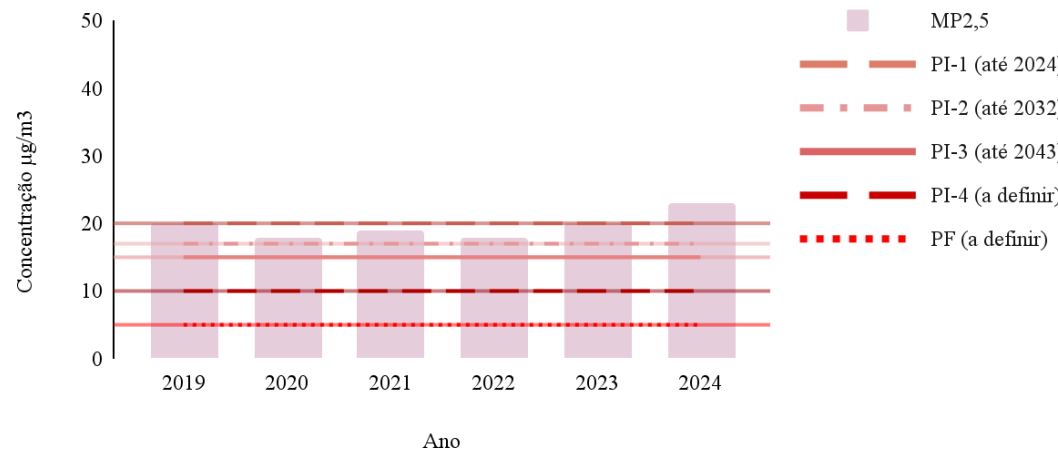
**Figura 6.** Concentração de emissões de MP10 na Marginal Tietê.



Fonte: Autoria própria.

Enquanto a emissão de dióxido de nitrogênio ultrapassa os limites, e a de MP<sub>10</sub> necessita de ação emergencial para que continue dentro do estabelecido, os padrões de MP<sub>2,5</sub> (figura 7) nos anos de 2019-2024 estão acima do permitido para o padrão intermediário 1, que também exige ação emergencial.

**Figura 7.** Concentração de emissões de MP2,5 na Marginal Tietê (São Paulo)



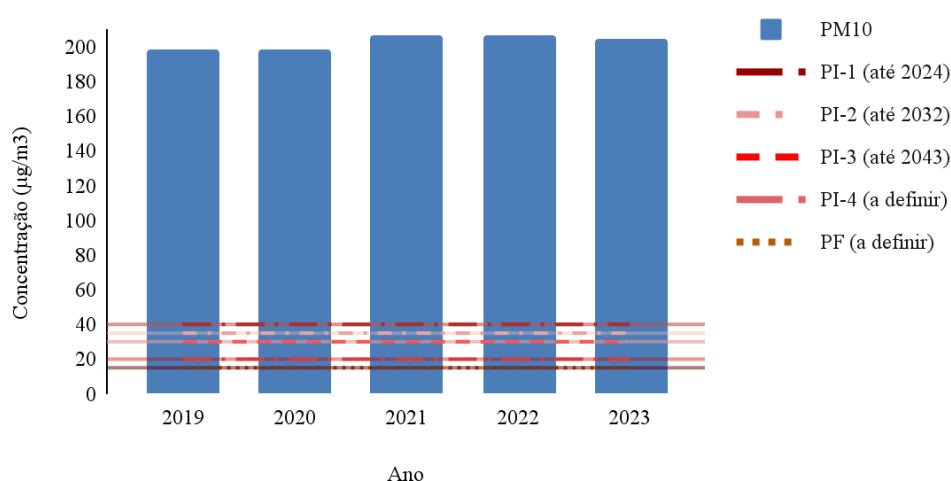
Fonte: Autoria própria.

Com base nos valores obtidos nos relatórios de 2019 a 2024 e nas emissões de poluentes, observou-se que, em locais menos urbanizados, o comportamento dos gráficos foi semelhante ao de Sorocaba. No entanto, em dois pontos de monitoramento (Congonhas e Marginal Tietê), os níveis de poluição do ar excederam os padrões estabelecidos.

Não foram contabilizados os índices da cidade nessa seção, pois as redes de monitoramento foram desativadas em 2013, não havendo possibilidade de comparação com os níveis atuais.

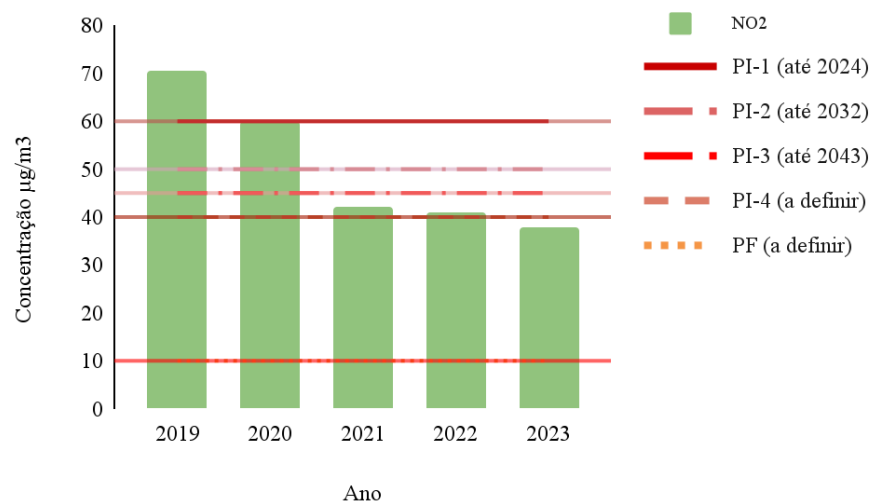
Para corroborar na pesquisa também foi utilizado as emissões de material particulado (MP<sub>10</sub>) em Délhi, capital da Índia (figura 8) para buscar se há semelhança entre os níveis de emissão e quão distantes estão dos padrões brasileiros (CONAMA 506/24). A mesma comparação foi realizada para os níveis de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) (figura 9) e com os níveis de material particulado (MP<sub>2,5</sub>) (figura 10).

**Figura 8.** Concentração de emissões de material particulado MP10 na Índia comparadas aos padrões estabelecidos pela resolução Brasileira (CONAMA 506/24).



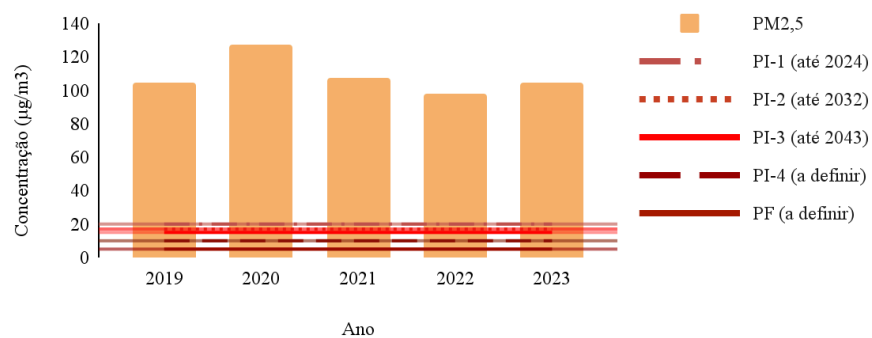
Fonte: autoria própria.

**Figura 9.** Concentração de emissões de material particulado dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) na Índia comparadas aos padrões estabelecidos na resolução Brasileira (CONAMA 506/24).



Fonte: autoria própria.

**Figura 10.** Concentração de emissões de material particulado dióxido de nitrogênio (MP<sub>2,5</sub>) na Índia comparadas aos padrões estabelecidos pela resolução Brasileira (CONAMA 506/24).



Fonte: autoria própria

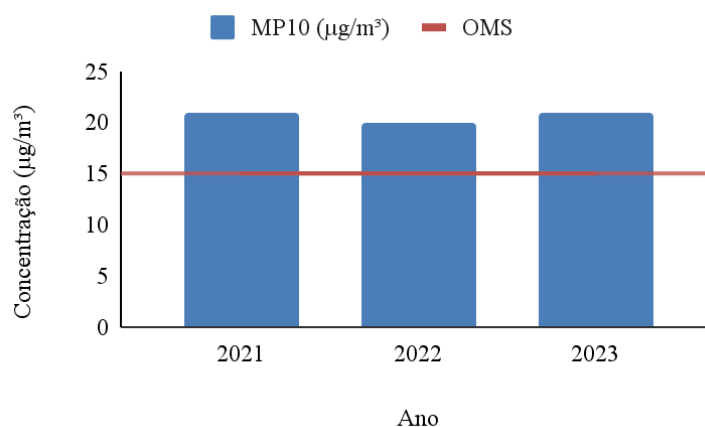
## 5.2 A problemática das doenças causadas pela poluição

Os valores contidos na resolução CONAMA são distintos daqueles que são emitidos e propostos como limites médios na Organização da Saúde, ao passo que

ela baseia-se nos padrões ou emissões do mundo de um modo geral, sendo que para maior segurança dos habitantes, o valor é o mais restrito possível, ou seja, aquele que causará menores danos a qualidade de vida.

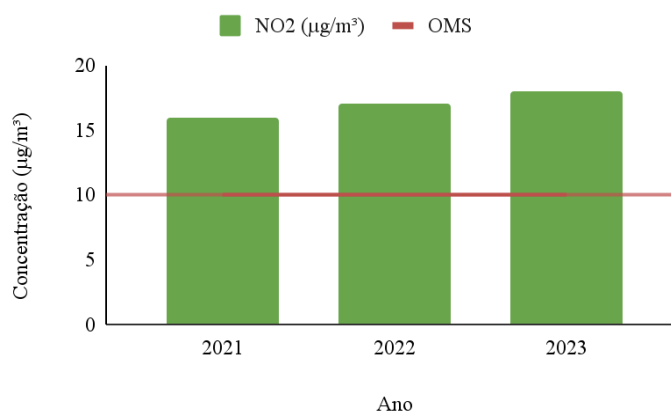
Como descrito no tópico anterior, os parâmetros que a legislação determina não correspondem, de modo análogo, quando trata-se da saúde. Existem níveis que são estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) que quando são comparados às mesmas emissões na cidade de estudo (Sorocaba) estão extrapolando o estabelecido pela organização (figura 11) e (figura 12).

**Figura 11.** Padrões estabelecidos pela OMS para a emissão de material particulado 10  $\mu\text{g}$  e comparados com as emissões em Sorocaba.



Fonte: autoria própria.

**Figura 12.** Concentração de emissões de Dióxido de nitrogênio, padrões OMS para o poluente e comparados com as emissões em Sorocaba.



Fonte: autoria própria.

Os valores de emissão atmosférica registrados entre 2019 e 2023 ultrapassaram os limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) para dióxido de nitrogênio e material particulado.

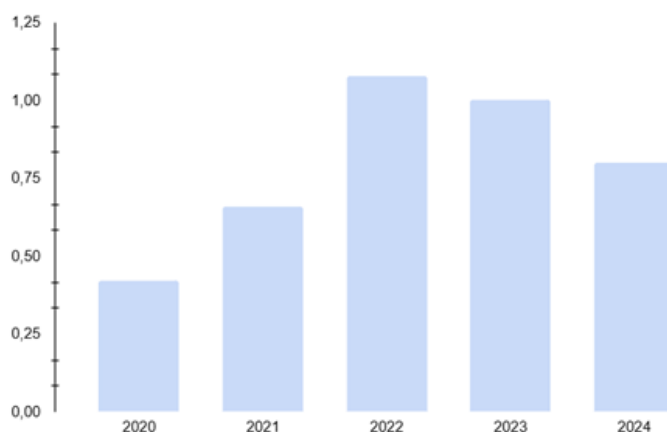
A Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEA-6, Nairóbi, 2024) ocorrida de 26 de fevereiro a 1 de março de 2024 que contempla resoluções para mitigação de impactos ambientais, foi instituída a resolução (UNEP/EA.6/Res.10) que discorre sobre a “qualidade do ar e poluição atmosférica global” e salienta que a população mais vulnerável tem o maior risco aos impactos da poluição com a emissão de poluentes como o material particulado e ozônio.

A proposta incentiva a sensibilização da população e órgãos públicos tendo em vista as consequências e possíveis ações para amenizar os riscos como propostas de ciência e aprendizagem e ações de implementação dando prioridade aos países em desenvolvimento, sendo o Brasil um país emergente.

Para a população de Bruxelas, quando questionada sobre as definições para a poluição atmosférica, relatou um preocupante índice: conceber aquilo que polui o associando a algo que exala odor forte, como as fumaças advindas de chaminés ou aterros sanitários. Salienta-se, portanto, que para os pesquisadores a visão é distinta e observa que a ameaça é real ainda que não explore os sentidos olfativos (Noël, *et al*, 2022).

Os gráficos contém os dados fornecidos pela Secretaria de Saúde da cidade de Sorocaba na cidade foco do estudo e calculados através do coeficiente geral de internação (CGI) para que os dados fossem relativizados de acordo com a população anual da cidade (figura 13 e figura 14).

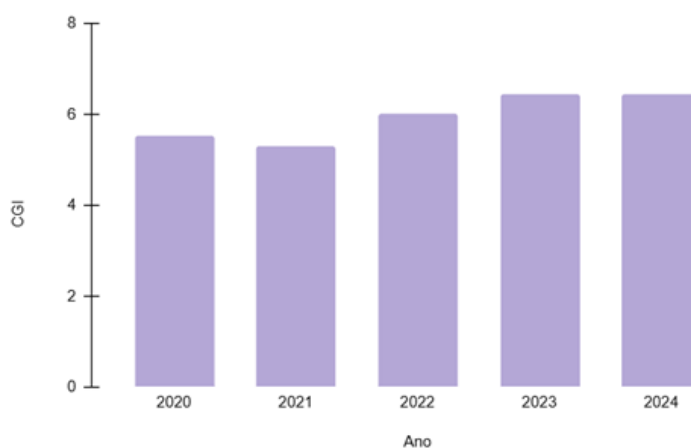
**Figura 13.** Coeficiente geral de internação (CGI) para problemas do aparelho respiratório em crianças menores de 4 anos.



Fonte: autoria própria.

O mesmo cálculo foi realizado para as doenças do aparelho circulatório em idosos com mais de 60 anos.

**Figura 14.** Coeficiente geral de internação (CGI) para problemas do aparelho circulatório em idosos com mais de 60 anos.



Fonte: autoria própria

Um fator que pode ser levado em consideração durante a pandemia é a diminuição considerável dos casos de prejuízos à saúde quanto à qualidade do ar. Ainda que, haja controvérsia quanto ao número de óbitos e internações, do ponto de vista climático e meteorológico, a diminuição das emissões implicou em melhoria na qualidade do ar, uma vez que durante a pandemia as indústrias, comércios, fábricas

e transporte tiveram seu funcionamento interrompido (Liu *et al*, 2023, 2025). A redução das atividades industriais durante a pandemia permitiu um estudo mais apurado relacionado aos impactos da poluição causada pelas atividades humanas, essas mudanças auxiliaram na diminuição da poluição.

Na China, há variações distintas de diferentes relações entre as estações do ano e dados que relacionam os índices de dióxido de nitrogênio atmosféricos revelaram que as concentrações diminuíram entre os períodos mais rigorosos da pandemia após esse período (Chu *et al*, 2020).

Além disso, infere-se que PM<sub>2,5</sub> e NO<sub>2</sub> têm um impacto maior nas admissões cardiovasculares entre pacientes com menos de 65 anos de idade, enquanto o SO<sub>2</sub> tem um impacto maior em pacientes com 85 anos ou mais (Yu *et al*, 2024). Esse pode ser um dos motivos pelos quais a quantidade de estudos relacionados ao PM<sub>2,5</sub> é mais expressiva do que para a exposição ao dióxido de enxofre, pois a população brasileira possui expectativa de vida etária média inferior.

## **5.2 Alterações morfofisiológicas nos vegetais expostos a poluição**

Diante as situações de emissão de poluentes apresentadas, a preocupação com a qualidade do ar é cada vez mais necessária. Com os resultados obtidos nos gráficos, infere-se que se não houverem ações os níveis de poluição aumentam e afetam ainda mais a saúde da população.

Por isso, uma das formas de reconhecer a poluição também é por meio do biomonitoramento através dos bioindicadores vegetais, que neste estudo a busca por cada uma das espécies inseridas nos municípios pesquisados apresenta variação morfológica e estrutural nos vegetais expostos à condições de poluição atmosféricas, que foram a base para a busca e estudo dos artigos.

Dessa forma, após a leitura dos artigos foi possível reconhecer que não há referências diretas às legislações e padrões para emissão dos poluentes analisados e a ocorrência das doenças é mencionada de forma superficial.



Dentre as espécies da cidade de Sorocaba, encontrou-se 52 das quais existem estudos que descrevem seu potencial bioindicador, porém as que possuem os poluentes atmosféricos são 14. O número de espécies analisadas foi de 457. As espécies com potencial bioindicador estão descritas no apêndice 1.

Nos vegetais, diversos fatores são alterados como a temperatura, o tipo de poluente atmosférico, disponibilidade hídrica, morfologia e fisiologia. Em cada um dos artigos, foram observadas diferentes alterações morfofisiológicas, dependendo da espécie vegetal e do tipo de poluente envolvido.

Em alguns casos, as folhas apresentaram modificações estruturais, como espessamento da epiderme, funcionando como barreira na absorção de poluentes. Outras pesquisas identificaram mudanças na área radicular, incluindo crescimento reduzido ou alterações na absorção de nutrientes e contaminação do solo. Além disso, houve variações no índice de ácido ascórbico na área foliar, um indicador da resposta antioxidante das plantas ao estresse ambiental na maioria dos estudos (Molina; Segura, 2021).

A exposição a poluentes também levou a modificações nos estômatos, como redução na densidade e fechamento parcial, interferindo transpiração e a fotossíntese. No mesófilo, alterações na organização celular e nas estruturas internas em regiões expostas a altos níveis de poluição (Torres, 2008).

Na maioria das análises, foram observadas injúrias foliares ou necroses, além de alterações morfológicas e anatômicas diversas, desde danos celulares até redução nos estômatos. A análise das características morfológicas foi realizada por meio de microscopia óptica e eletrônica, para observação morfológica e estrutural da planta. Enquanto os níveis de poluentes foram medidos por meio espectroscopia, utilizando técnicas como espectrofotometria UV-Visível e fluorescência.

Os vegetais não possuem os mesmos parâmetros descritos, o que dificulta a comparação por meio das mesmas características. Dessa forma, a descrição das alterações morfológicas foi realizada a cada um deles.

## **Estações meteorológicas**

O impasse iniciou-se na verificação das Estações Meteorológicas da cidade de Sorocaba. Para a verificação das condições climáticas propícias ao estudo e ao desenvolvimento dos vegetais analisados, utilizou-se o levantamento do INMET, mas as 2 estações anteriormente localizadas na cidade de Sorocaba foram desativadas.

A estação 83851, localizada na Faculdade de Tecnologia de Sorocaba é o levantamento mais próximo ao local foi utilizado que corresponde a estação de Iperó código A713 que está na Floresta Nacional de Ipanema e não pertence a cidade de Sorocaba pois abrange parte dos municípios de Araçoiaba da Serra, Iperó e Capela do Alto. Desse modo, novamente foi necessário recorrer aos dados não oficiais.

Existe uma terceira estação, implementada em 2021 pela UFSCar Sorocaba e localizada no mesmo local, os dados por essa disponibilizados permitem predizer a correlação da fenologia botânica com a meteorologia. Os dados do laboratório foram obtidos por meio de comunicação via e-mail.

Em conjunto com os dados da UFSCar também foi utilizada a base de dados do INMET em seu levantamento diário, para fins de pesquisa e comparação entre a ocorrência das principais espécies consideradas bioindicadores da cidade de Sorocaba e com a fenologia de cada vegetal e o clima, pois constitui uma importante característica que quando observada junto as condições meteorológicas locais pode ser motivo de influência no crescimento.

## **5.4 Resultados estatísticos (GLM):**

Os modelos lineares generalizados (GLM) foram utilizados para avaliar a possível associação entre os níveis de poluentes atmosféricos registrados no município de Sorocaba e os indicadores de saúde relacionados às internações e mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares no período de 2020 a 2024. As análises consideraram como variáveis explanatórias as concentrações mensais de NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> e MP10, enquanto as variáveis resposta

corresponderam às taxas de internação e mortalidade nas faixas etárias de crianças menores de quatro anos e idosos acima de 60 anos.

Os resultados do GLM demonstraram associação estatisticamente significativa apenas entre as concentrações de monóxido de nitrogênio (NO) e as internações por doenças respiratórias em crianças menores de quatro anos ( $p = 0,017$ ). O composto NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e MP10 não apresentaram associação significativa com os desfechos analisados ( $p > 0,05$ ).

Além das variáveis ambientais, observou-se significância estatística para alguns anos do período analisado, especialmente aqueles correspondentes ao contexto pandêmico da COVID-19. Os anos de 2020 ( $p = 0,048$ ), 2021 ( $p = 0,001$ ) e 2022 ( $p = 0,001$ ) apresentaram associação significativa com as taxas de internação respiratória infantil.

Para a população idosa (>60 anos), não foram observadas associações estatisticamente significativas entre os poluentes atmosféricos analisados e os indicadores de internação ou mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares.

Os resultados completos dos modelos estatísticos encontram-se apresentados nos apêndices 2, 3, 4, 5 e 6.

## **6. DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos no presente estudo evidenciaram associação estatisticamente significativa exclusivamente entre as concentrações de monóxido de nitrogênio (NO) e as internações por doenças respiratórias em crianças menores de quatro anos no município de Sorocaba. A ausência de associação significativa para os demais poluentes atmosféricos e para a população idosa demonstra a complexidade inerente às análises epidemiológicas envolvendo poluição atmosférica e saúde humana, sobretudo em estudos ecológicos realizados em centros urbanos de médio porte.

A associação observada para o NO sugere importante influência das emissões veiculares sobre os agravos respiratórios infantis no município estudado. Os óxidos de nitrogênio constituem importantes marcadores de combustão fóssil,

sendo amplamente associados ao tráfego urbano, especialmente em regiões com intensa circulação automotiva e atividade logística. Segundo Saldiva (2022), as emissões veiculares urbanas representam uma das principais fontes de exposição humana aos compostos nitrogenados em cidades brasileiras.

A literatura nacional corrobora os resultados encontrados no presente estudo. Gouveia et al. (2006), ao analisarem cidades brasileiras, observaram associação entre poluição atmosférica e aumento das interações respiratórias em crianças, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Estudos realizados por Boing et al. (2012) também identificaram relação entre poluentes atmosféricos e agravamento de doenças respiratórias pediátricas no sul do Brasil.

Resultados semelhantes foram descritos internacionalmente por Grigg (2018), que demonstrou que compostos nitrogenados provenientes do tráfego urbano estão associados ao aumento de inflamações respiratórias, exacerbação de asma e hospitalizações infantis. Além disso, a World Health Organization (2021) reconhece a poluição atmosférica como um dos principais fatores ambientais relacionados à morbidade respiratória infantil em áreas urbanizadas.

Do ponto de vista fisiológico, crianças constituem um dos grupos mais vulneráveis à exposição aos poluentes atmosféricos. Conforme descrito por Saldiva (2019) e Andrade (2020), essa susceptibilidade está relacionada à imaturidade pulmonar, ao menor diâmetro das vias aéreas, ao desenvolvimento incompleto do sistema imunológico e à maior frequência respiratória proporcional ao peso corporal, favorecendo maior deposição dos poluentes no trato respiratório inferior.

Apesar da associação significativa encontrada para o NO, os demais poluentes analisados não apresentaram significância estatística no modelo empregado. Tal resultado não necessariamente indica ausência de efeitos biológicos, mas pode refletir limitações relacionadas à variabilidade temporal dos dados, ao período relativamente curto de análise e às interações atmosféricas entre os diferentes compostos químicos presentes no ar urbano. Segundo Philippi Jr. (2021), os poluentes atmosféricos apresentam comportamento altamente dinâmico e frequentemente interdependente, dificultando a identificação isolada dos efeitos toxicológicos de cada substância.

Outro aspecto relevante refere-se à influência do período pandêmico da COVID-19 sobre os resultados estatísticos observados. Alguns anos analisados apresentaram significância estatística independente no modelo, coincidindo temporalmente com os períodos de maior circulação viral e alterações nos padrões de mobilidade urbana. Estudos desenvolvidos por He et al. (2021) demonstraram que a pandemia alterou significativamente tanto os padrões de emissão atmosférica quanto o comportamento epidemiológico das doenças respiratórias, interferindo nos modelos de associação entre poluição e saúde.

Durante o período pandêmico, ocorreram reduções temporárias nas emissões veiculares em diversos centros urbanos do mundo, modificando a concentração de poluentes atmosféricos, especialmente compostos nitrogenados. Entretanto, paralelamente houve aumento expressivo das hospitalizações respiratórias relacionadas à infecção viral, criando potenciais fatores de confusão epidemiológica. Segundo World Health Organization (2021), a COVID-19 provocou alterações sem precedentes nos indicadores globais de morbidade respiratória e exposição ambiental.

A ausência de significância estatística para a população idosa também merece reflexão crítica. Embora a literatura frequentemente descreva idosos como grupo vulnerável aos efeitos da poluição atmosférica, diversos fatores podem interferir nesse comportamento epidemiológico. Conforme discutido por Gouveia (2018), populações idosas apresentam múltiplas comorbidades e elevada heterogeneidade clínica, dificultando a detecção estatística do efeito isolado dos poluentes atmosféricos em estudos ecológicos.

Quanto aos bioindicadores vegetais, embora o levantamento florístico e morfofisiológico tenha demonstrado potencial relevante para o biomonitoramento ambiental, não foi possível estabelecer correlação estatística direta entre as alterações vegetais e os indicadores de saúde humana analisados e não houve validação no campo. Tal limitação evidencia uma importante lacuna científica na literatura nacional e internacional. Segundo Furlan (2020), apesar da ampla utilização de bioindicadores vegetais para avaliação da qualidade ambiental, ainda são escassos os estudos capazes de integrar biomonitoramento vegetal, epidemiologia e saúde pública de maneira quantitativa.

Dessa forma, os resultados do presente estudo reforçam a importância do monitoramento contínuo da qualidade do ar em municípios de médio porte e evidenciam a necessidade de políticas públicas voltadas à redução das emissões veiculares e proteção de grupos vulneráveis, especialmente crianças. Além disso, o trabalho contribui para o avanço das discussões acerca da integração entre saúde ambiental, epidemiologia e biomonitoramento vegetal, temática ainda pouco explorada na literatura científica brasileira.

Adicionalmente, os achados do presente estudo tornam-se particularmente relevantes quando analisados à luz das normativas nacionais e internacionais de qualidade do ar abordadas na presente pesquisa. Embora os níveis de determinados poluentes monitorados no município de Sorocaba possam, em alguns períodos, estar enquadrados dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira vigente, os resultados observados demonstram que efeitos adversos à saúde podem ocorrer mesmo em concentrações consideradas legalmente aceitáveis, especialmente em grupos populacionais mais vulneráveis, como crianças menores de quatro anos.

A World Health Organization (2021) estabelece diretrizes globais mais restritivas para qualidade do ar quando comparadas aos padrões brasileiros atualmente vigentes, reconhecendo que não existem níveis totalmente seguros de exposição contínua a determinados poluentes atmosféricos. Tal cenário reforça a importância das discussões envolvendo a atualização progressiva das normativas ambientais brasileiras, especialmente diante das evidências epidemiológicas que relacionam compostos nitrogenados aos agravos respiratórios infantis.

No contexto nacional, a Resolução CONAMA nº 491/2018 estabeleceu novos padrões nacionais de qualidade do ar inspirados parcialmente nas recomendações da Organização Mundial da Saúde, porém organizados em metas intermediárias progressivas para adequação gradual dos estados brasileiros. Posteriormente, a Resolução CONAMA nº 506/2024 promoveu complementações relacionadas ao gerenciamento e monitoramento da qualidade atmosférica, reforçando a necessidade de ampliação das estratégias de controle ambiental e vigilância em saúde.

Os relatórios da CETESB (2024) demonstram que os óxidos de nitrogênio permanecem entre os principais indicadores de poluição atmosférica urbana no Estado de São Paulo, sobretudo em municípios com intenso fluxo veicular e atividade industrial. Nesse contexto, os resultados encontrados no presente estudo sugerem que a simples conformidade legal dos parâmetros atmosféricos pode não ser suficiente para assegurar proteção integral à saúde pública, especialmente em populações susceptíveis.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade do ar associado à avaliação epidemiológica local, contribuindo para discussões relacionadas à efetividade das normativas ambientais vigentes e à importância da aproximação progressiva dos padrões nacionais às recomendações internacionais de proteção à saúde humana. Além disso, os achados evidenciam a relevância da integração entre políticas públicas ambientais, planejamento urbano, vigilância em saúde e biomonitoramento ambiental, especialmente em municípios de médio porte submetidos à intensa urbanização e expansão veicular.

## **7. CONCLUSÃO**

O presente estudo buscou avaliar a relação entre poluição atmosférica, saúde pública e potenciais bioindicadores vegetais na cidade de Sorocaba-SP, por meio da integração de dados ambientais, epidemiológicos e revisão da literatura científica.

Os resultados demonstraram que, embora os níveis de poluentes atmosféricos em Sorocaba permaneçam majoritariamente dentro dos limites estabelecidos pela legislação nacional vigente, determinados parâmetros ultrapassam as recomendações propostas pela Organização Mundial da Saúde, evidenciando potenciais riscos à saúde pública. As análises epidemiológicas indicaram associação entre poluentes atmosféricos e agravos cardiorrespiratórios, especialmente em grupos vulneráveis. Em relação aos bioindicadores vegetais, observou-se potencial promissor para aplicação em biomonitoramento ambiental, porém ainda com limitações quanto à integração direta com indicadores epidemiológicos humanos.

Entre as limitações do estudo destacam-se a reduzida disponibilidade de redes de monitoramento atmosférico na cidade analisada, a escassez de estudos correlacionando biomonitoramento vegetal e saúde humana em escala urbana.

Os achados reforçam a importância do monitoramento integrado da qualidade do ar e da ampliação de políticas públicas voltadas à redução das emissões atmosféricas. Além disso, evidenciam a necessidade de novos estudos que integrem biomonitoramento vegetal, análise espacial e indicadores epidemiológicos, contribuindo para estratégias mais abrangentes de gestão ambiental e saúde pública.

## 8. RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Estudos futuros devem ampliar a integração entre biomonitoramento vegetal, análise epidemiológica e monitoramento atmosférico urbano, incorporando ferramentas de georreferenciamento, variáveis climáticas e análises espaciais. Recomenda-se ainda a realização de estudos experimentais com espécies bioindicadoras, visando validar sua aplicação no monitoramento ambiental e sua possível relação com indicadores de saúde pública.

## 9. REFERÊNCIAS

AGUILAR, M. V. M. et al. Tolerance and sensitivity of *Inga marginata* and *Allophylus edulis* to copper excess. **Trees (Berlin, Germany: West)**, v. 37, n. 3, p. 781–796, 2023.

AGUILAR, M. V. M. et al. Zinc toxicity and tolerance-related responses in *Inga marginata* and *Allophylus edulis* seedlings. **Revista Árvore**, v. 48, p. 1–13, 2024.

AHMAD, I. et al. Evaluation of the air pollution tolerance index of ornamentals growing in an industrial area compared to a less polluted area. **Horticulture, environment and biotechnology**, v. 60, n. 4, p. 595–601, 2019.

ALARIBE, F. O.; AGAMUTHU, P. *Lantana camara*—an ecological bioindicator plant for decontamination of Pb-impaired soil under organic waste-supplemented scenarios. **Pedosphere**, v. 29, n. 2, p. 248–258, 2019.



ANDRADE, Maria de Fátima et al. Air quality in the megacity of São Paulo: evolution over the last 30 years and future perspectives. *Atmospheric Environment*, Oxford, v. 159, p. 66-82, 2017.

**AR puro monitorar.** Dados.gov.br. Disponível em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/ar-puro-monitorar#:~:text=O%20MMA%20vem%20atuando%20em,incluindo%20o%20aplicativo%20mobile%20MonitorAr>. Acesso em: 20 de agosto de 2025.

ARCANJO-SILVA, S. et al. Hydroponic culture and physiological responses to arsenic in *Borreria verticillata* populations with differential tolerance to the metalloid. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, n. 3–4, p. 171–181, 2015.

ASUQUO, F. E.; BATE, G. B. Bioaccumulation of heavy metals in mangoes (*Mangifera indica* L.) found in the vicinity of gold mining sites of Zamfara State, Nigeria. **Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, v. 12, n. 1, p. 45–58, 2020.

Atmosfera. Departamento de Física - Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap1/cap1-2.html>. Acesso: 12 de maio de 2024.

AUTOR DESCONHECIDO. Beta ( $\beta$ ) Ray Absorption Method; HORIBA Industrial Process & Environment. Disponível em: <https://www.horiba.com/int/process-and-environment/measuring-principles/beta-ray-absorption-method/>. Acesso em 24 de abril de 2025.

BARRETO, M. L. Desigualdades em saúde: uma perspectiva epidemiológica. *Cadernos de Saúde Pública*, 2017.

BEZERRA, L. DE A.; CALLADO, C. H.; CUNHA, M. D. Does an urban environment affect leaf structure of *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae)? **Acta botanica Brasilica**, v. 34, n. 2, p. 266–276, 2020.

BOING, Antonio Fernando et al. Internações hospitalares por doenças respiratórias em crianças e poluição atmosférica no sul do Brasil. *Revista Paulista de Pediatria*, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 315-322, 2012.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Relatório anual de acompanhamento da qualidade do ar: 2024**. – Brasília, DF : MMA, 2025. 63 p. ISBN 978-85-7738-462-4

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Relatório anual de acompanhamento da qualidade do ar: 2024**. Brasília, DF: MMA, 2025. 63 p. ISBN 978-85-7738-462-4.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar / Ministério do Meio

Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Departamento de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos. – Brasília, DF: MMA, 2020. 136 p. : il. color. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar/guia-tecnico-para-o-monitoramento-e-avaliacao-da-qualidade-do-ar.pdf>. Acesso em 24 de abril de 2025.

BRITO, L. DE; SILVA, P. A.; FLUMINHAN, A. Alterações foliares sugerem efeitos da poluição veicular em plantas da família myrtaceae em áreas urbanas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 1, p. 223–231, 2019.

CALDANA, Cristiane R. G. *et al.* Evaluation of urban tree barks as bioindicators of environmental pollution using the X-ray fluorescence technique. **Chemosphere**, v. 312, p. 137257, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137257>. Acesso em: 23 de abril de 2024.

CETESB, 2007. Estudo investigativo da ocorrência de ozônio troposférico por meio de biomonitoramento, no município de Brotas - SP.

CHU, Biwu *et al.* Significant concurrent decrease in PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations in China during COVID-19 epidemic. **Journal of Environmental Sciences**, v. 99, p. 346-353, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.06.031>.

Clements, A., R. Duvall, D. Greene, AND T. Dye. The Enhanced Air Sensor Guidebook. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2024*. São Paulo: CETESB, 2024.

CPCB - Central Pollution Control Board (Índia). NATIONAL AMBIENT AIR QUALITY STANDARDS CENTRAL POLLUTION CONTROL BOARD NOTIFICATION New Delhi, the 18th November, 2009.

DA SILVA, L. C. *et al.* Clusia hilariana and Eugenia uniflora as bioindicators of atmospheric pollutants emitted by an iron pelletizing factory in Brazil. **Environmental science and pollution research international**, v. 24, n. 36, p. 28026–28035, 2017.

DA SILVA, L. C. *et al.* Leaf Morpho-anatomical structure determines differential response among restingia species exposed to emissions from an iron ore pelletizing plant. **Water, air, and soil pollution**, v. 231, n. 4, 2020.

DE ALMEIDA BEZERRA, L. *et al.* Chemical and cytotoxic changes in leaves of Eugenia uniflora L., a medicinal plant growing in the fourth largest urban centre of Latin America. **Trees (Berlin, Germany: West)**, 2021.

DE ARAÚJO, H. H. et al. Atmospheric pollution affects the morphoanatomical and physiological responses of plants in urban Atlantic Forest remnants. **Environmental science and pollution research international**, v. 32, n. 8, p. 4567–4587, 2025.

DE CARVALHO SILVA, T. A. et al. Tolerance of *Hancornia speciosa* Gomes (Apocynaceae) to potassium fluoride: physiological and anatomical traits. **Acta physiologiae plantarum**, v. 42, n. 9, 2020.

DE MELO FARNEZI, M. M. et al. Potential of grasses in phytolith production in soils contaminated with cadmium. **Plants**, v. 9, n. 1, p. 109, 2020.

DE SOUZA, B. B. et al. Critical analysis of the potential of *Psidium guajava* cv Paluma (guava tree) for ozone biomonitoring under seasonal subtropical climate. **Ecological indicators**, v. 143, n. 109296, p. 109296, 2022.

DELVES, Jay et al. Lichens as spatially transferable bioindicators for monitoring nitrogen pollution. **Environmental Pollution**, p. 121575, abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121575>. Acesso em: 05 de maio de 2024.

DOS SANTOS SOARES, C. et al. Characterizing pioneer plants for phytoremediation of mercury-contaminated urban soils. **International journal of environmental science and technology: IJEST**, 2025.

DUBIUM, P. **Cadmium stress-induced sensitivity responses in** ., [s.d.]. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/download/90847/51505>>. Acesso em fev. 2025

EBONG, G. A., H. S. ETUK, and E. A. MOSES. 2015. “Mangifera Indica AS BIOINDICATOR OF METAL POLLUTION ALONG MAJOR ROADSIDES WITHIN AKWA IBOM STATE, NIGER DELTA REGION OF NIGERIA”. *Journal of Applied Chemical Science International* 5 (2):93-100. <https://ikprress.org/index.php/JACSI/article/view/3569>.

Efeitos da poluição. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/solo/efeitos-da-poluicao>. Acesso: 12 de maio de 2024.

EL-AMIER, Y. A.; ALGHANEM, S. Tree leaves as bioindicatand), v. 26, n. 7, p. 991–1001, 2017.

ELLOUMI, N. et al. Adaptive biochemical and physiological responses of *Eriobotrya japonica* to fluoride air pollution. **Ecotoxicology (London, Engl(Brazil))**, 2009.

**ESPÉCIES arbóreas brasileiras: volume 2 – Vacum**. [S.l.]: Embrapa, 2025. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1140774/1/Especies-Arborea-s-Brasileiras-vol-2-Vacum.pdf>. Acesso em: 20 de agosto de 2025.

FARIA, Bruna Fernanda et al. Study of environmental contamination in growth tree rings of *Copaifera Langsdorfii* by SR-TXRF: evaluation of Cr, Ni, Cu, Zn and Pb. Associação Brasileira de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, RJ or of heavy metal pollution from soil and ambient air in urban environmental. 2018.

FERREIRA, Tatiane Moraes; FORTI, Maria Cristina; ALVALA, Plinio Carlos. PROTOCOLO PARA COLETA DE MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO; INPE. Disponível em: <sid.inpe.br/mtc-m19/2012/01.30.16.15-NTC>. Acesso em 24 de abril de 2025.

FILIPPOVA, M. et al. Regional-scale air pollution source identification using backward particle dynamics. **Atmospheric environment (Oxford, England: 1994)**, v. 345, n. 121044, p. 121044, 2025.

FURLAN, Sandra Regina de Arruda et al. Bioindicadores vegetais aplicados ao monitoramento da poluição atmosférica urbana. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, São Paulo, n. 55, p. 85-101, 2020.

GIAMPAOLI, Patricia; TAVARES, Armando Reis; DOMINGOS, Marisa. Physiological responses of two different epiphytic bromeliads exposed in a polluted subtropical region in southeast Brazil characterized by seasonal climate. **Ecological Indicators**, v. 120, p. 106945, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106945>. Acesso em: 20 maio 2024.

GOUVEIA, Nelson et al. Associação entre poluição do ar e internações por doenças respiratórias em crianças e idosos em São Paulo. *Revista de Saúde Pública*, São Paulo, v. 40, n. 2, p. 267-272, 2006.

GOUVEIA, Nelson et al. Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, Brasília, v. 12, n. 1, p. 29-40, 2003.

GRIGG, Jonathan. Air pollution and respiratory infection in children. *Paediatric Respiratory Reviews*, London, v. 29, p. 39-42, 2019.

GU, Xiaoyu; LI, Zhengrui; SU, Juan. Air pollution and skin diseases: A comprehensive evaluation of the associated mechanism. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 278, p. 116429, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116429>. Acesso em: 10 jun. 2024.

GUPTA, D. et al. Tolerance and performance assessment of common subtropical vegetation growing along a highway for bio-monitoring and abatement of air pollution. **Air quality, atmosphere, & health**, v. 18, n. 2, p. 537–553, 2025.

HABERMANN, Mateus et al. Socioeconomic inequalities and exposure to traffic-related air pollution in the city of São Paulo, Brazil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 30, n. 1, p. 119-125, jan. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-311x00168412>. Acesso em: 16 fev. 2026.

HAN, J. et al. Chemical aspects of human and environmental overload with fluorine. **Chemical reviews**, v. 121, n. 8, p. 4678–4742, 2021.

HASSAN, Ayah. KADEN, Debra A. Dorona and other acute air pollution episodes. *Encyclopedia of Toxicology (Fourth Edition)*. Volume 3, 2024, Pages 929-931. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00389-4>. Acesso em 16 de maio de 2024.

HE, Xiaoqing; PAN, Jialiang; TANAKA, Tetsuya. The short-term impacts of COVID-19 lockdown on urban air pollution in China. *Nature Sustainability*, London, v. 3, p. 1005-1011, 2020.

HENDRA PRASETIA et al. *Mangifera indica* as Bioindicator of Mercury Atmospheric Contamination in an ASGM Area in North Gorontalo Regency, Indonesia. *Geosciences*, v. 8, n. 1, p. 31–31, 19 jan. 2018.

HUANG, Yuanyin *et al.* Mangrove plants are promising bioindicator of coastal atmospheric microplastics pollution. **Journal of Hazardous Materials**, p. 133473, jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133473>. Acesso em: 23 de abril de 2024.

ISLAM, R. et al. Assessment of heavy metal accumulation in urban plants and soils: Evaluation of impacts of air pollution in Dhaka, Bangladesh. **Water, air, and soil pollution**, v. 236, n. 3, 2025.

JUNGER, Washington Leite et al. Impact of air pollution on respiratory hospital admissions among children and elderly residents of São Paulo, Brazil. *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 23, supl. 4, p. S575-S586, 2007.

KARMAKAR, D.; DEB, K.; PADHY, P. K. Ecophysiological responses of tree species due to air pollution for biomonitoring of environmental health in urban area. **Urban climate**, v. 35, n. 100741, p. 100741, 2021.

KAUR, L.; CHARAN, P. D.; CHOYAL, R. Evaluation of air pollution tolerance index of tree species of Bikaner city (Rajasthan). **Holistic Approach to Environment**, 2023.

LEITE, Carlos. Mapping the (un)healthy city: Proximity to urban facilities and chance of premature mortality from myocardial infarction in São Paulo city, **Cities**, Volume 148, 2024, 104864, ISSN 0264-2751. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104864>.

LI, Ruofei *et al.* Bioindicator responses to extreme conditions: Insights into pH and bioavailable metals under acidic metal environments. **Journal of Environmental Management**, v. 356, p. 120550, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120550>. Acesso em: 23 de abril de 2024.

LIU, C. et al. Effects of nitrogen regulation on heavy metal phytoextraction efficiency (*Leucaena leucocephala*): Application of a nitrogen fertilizer and a fungal agent.

**Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)**, v. 355, n. 124102, p. 124102, 2024.

MACEDO, F. G. et al. Understanding the effects of lithium exposure on castor bean (*Ricinus communis*) plants, a potential bioindicator of lithium-contaminated areas. **Environmental science and pollution research international**, v. 31, n. 39, p. 51991–52000, 2024.

MELO, Luma. Women in toxicology in the United States. **Toxicology Research**, Volume 10, Issue 4, August 2021, p. 902–910. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/toxres/tfab075>. Acesso em 16 de maio de 2024.

MOLINA, Lázaro; SEGURA, Ana. Biochemical and Metabolic Plant Responses toward Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals Present in Atmospheric Pollution. *Plants*, v. 10, n. 11, p. 2305, 26 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants10112305>. Acesso em 12 de maio de 2026.

NAKAZATO, R. K. et al. Efficiency of biomonitoring methods applying tropical bioindicator plants for assessing the phytotoxicity of the air pollutants in SE, Brazil. **Environmental science and pollution research international**, v. 25, n. 20, p. 19323–19337, 2018.

NOËL, C. et al. The public's perceptions of air pollution. What's in a name? **Environmental health insights**, v. 16, p. 11786302221123563, 2022.

NOGUEIRA, L. et al. Phytotoxicity of petroleum-contaminated soil and bioremediated soil on *Allophylus edulis*. **Rodriguésia**, v. 62, n. 3, p. 459–466, 2011.

PHILIPPI JR., Arlindo; MALHEIROS, Tadeu Fabrício. *Saúde ambiental e sustentabilidade*. Barueri: Manole, 2021.

PICÓ, Yolanda *et al.* Wild and ruderal plants as bioindicators of global urban pollution by air, water and soil in Riyadh and Abha, Saudi Arabia. **Science of The Total Environment**, p.

R Core Team (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RAGGI, F. A. S. et al. **The use of *Oeceoclades maculata* (Lindley) Lyndley as an active bioindicator of metals concentration in the urban atmosphere**. 2023. Disponível em: <<https://papers.ssrn.com/abstract=4423914>>. Acesso em: fev. 2025.

RAHMAWATI, A.; NAHARI, F. S. N.; WINANDARI, O. P. Stomatal Density of Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lamk.) Leaves as a Bioindicator of Urban Air Quality in Bandar Lampung. **Indonesian Journal of Environment and Sustainability Issues**, v. 1, n. 2, p. 97–107, 2024.

RANGEL-OSORNIO, Violeta et al. Effects of air pollution on chlorophyll content and morphology of lichens transplanted around a paper industry (Morelia, Mexico). **The Bryologist**, v. 124, n. 1, 16 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1639/0007-2745-124.1.052>. Acesso em: 20 maio 2024.

Região Metropolitana de Sorocaba; Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://www.emtu.sp.gov.br/emtu/institucional/quem-somos/sorocaba.fss>. Acesso: 12 de maio de 2024.

RODRIGUES, A. A. et al. Fluoride in simulated rain affects the morphoanatomy and physiology of *Eugenia dysenterica* (Mart.) DC. **Ecological indicators**, v. 82, p. 189–195, 2017.

RODRIGUES, D. A. et al. Bioindicator potential of *Ricinus communis* to simulated rainfall containing potassium fluoride. **PeerJ**, v. 8, n. e9445, p. e9445, 2020.

RODRIGUES, D. A. et al. *Byrsonima basiloba* as a bioindicator of simulated air pollutants: Morphoanatomical and physiological changes in response to potassium fluoride. **Ecological indicators**, v. 89, p. 301–308, 2018.

RODRIGUES, Douglas Almeida *et al.* *Spondias mombin*, a potential bioindicator of potassium fluoride pollution. **Ecological Indicators**, v. 114, p. 106314, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106314>. Acesso em: 29 de abril de 2024.

S. T. Garba<sup>1\*</sup>, M. Gudusu<sup>2</sup> and L. B. Inuwa<sup>1</sup>. International Research Journal of Pure & Applied Chemistry. Accumulation Ability of the Native Grass Species, *Cyperus rotundus* for the Heavy Metals; Zinc (Zn), Cadmium (Cd), Nickel (Ni) and Lead (Pb). 17(1): 1-15, 2018; Article no.IRJPAC.44604. ISSN: 2231-3443, NLM ID: 101647669

SADIA, H. E. et al. Air pollution tolerance index of *Mangifera indica* plant species growing in the greater Dhaka region, Bangladesh. **Journal of biodiversity conservation and bioresource management**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2019.

SALA, H. R. et al. Different cadmium levels alter growth and antioxidant defense response in *Cedrela fissilis* and *Colubrina glandulosa*. **Flora**, v. 276–277, n. 151765, p. 151765, 2021.

SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento. *Poluição atmosférica e saúde humana*. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento. *Vida urbana e saúde: os desafios dos habitantes das metrópoles*. São Paulo: Contexto, 2019.

Schneider, J., Pires Bione, N. C., Sieklicki, J., Gomes de Oliveira, P. P., Costa de Oliveira Filho, P. ., & Delgado-Martínez, R. (2024). Avaliação da genotoxicidade de poluentes atmosféricos relacionados ao trânsito veicular por meio de

biomonitoramento com *Tradescantia pallida* var. *purpurea* . *Scientia Plena*, 20(3). <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2024.031701>

Secretaria do meio ambiente, infraestrutura e logística (SEMIL). Boletim diário de Composição do ar atmosférico. Disponível em: <http://s.ambiente.sp.gov.br/html-ar/boletim-diario.html>. Acesso: 12 de maio de 2024.

SETU, S. et al. Phytomonitoring of air pollution around brick kilns in urban area: Exploring the potential of plants for the remediation of pollutants. **Chemosphere**, v. 368, n. 143721, p. 143721, 2024.

STORCH-BÖHM, R. F. et al. Urban afforestation: using phytotoxicity endpoints to compare air pollution tolerance of two native Brazilian plants Aroeira (*Schinus terebinthifolius*) and Cuvatã (*Cupania vernalis*). **Environmental science and pollution research international**, v. 29, n. 37, p. 56579–56591, 2022.

TAKANO, Ana Paula Cremasco *et al.* Pleural anthracosis as an indicator of lifetime exposure to urban air pollution: An autopsy-based study in Sao Paulo. **Environmental Research**, v. 173, p. 23-32, jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.006>. Acesso em: 20 de agosto 2025.

TAKANO, Ana; *et al.* Association of pulmonary black carbon accumulation with cardiac fibrosis in residents of Sao Paulo, Brazil. **Environmental Research**. Disponível em: doi: 10.1016/j.envres.2024.118380. Acesso em 30 de maio de 2024.

TERWAYET BAYOULI, Ines *et al.* Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment. **Ecological Indicators**, v. 125, p. 107508, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107508>. Acesso em: 29 de abril 2024.

TIWARI, P.; PANDEY, S. Impact of Cement Dust Pollution on Leaf Anatomical Features of *Lantana camara* and *Calotropis procera*. Disponível em: <<https://www.curreweb.com/csi/csi/2017/34-40.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2025.

**UA Sensors**. Disponível em: <https://aq-sensors.shinyapps.io/UASensors/>. Acesso em: 20 de agosto de 2025.

Vasilevskaya, Natalia. Pollution of the Environment and Pollen: A Review. *Stresses* 2022, 2, 515–530. <https://doi.org/10.3390/stresses2040035>.

**Vista do Potencial do uso de parâmetros bioquímicos de uma espécie de orquídea como bioindicadora de poluição atmosférica**. Disponível em: <<https://conferenciasunifoa.emnuvens.com.br/tc/article/view/1739/1746>>. Acesso em: 20 mar. 2025.



Vormittag, *et al.* Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Energia e ambiente**. Estud. av. 35 (102). May-Aug 2021. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>.

WANG, Zhuhong *et al.* Metabolisms of both inorganic and methyl-mercury in hens reveal eggs as an effective bioindicator for environmental Hg pollution. **Journal of Hazardous Materials**, dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133191>. Acesso em: 23 de abril de 2024.

WARNASURIYA, Sashika D. *et al.* Fungi as environmental bioindicators. **Science of The Total Environment**, v. 892, p. 164583, set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164583>. Acesso em: 19 de abril de 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Air pollution and child health: prescribing clean air. Geneva: WHO, 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: WHO, 2021.

Zielińska-Błajet, M., & Feder-Kubis, J. (2020). Monoterpenes and Their Derivatives-Recent Development in Biological and Medical Applications. *International journal of molecular sciences*, 21(19), 7078. <https://doi.org/10.3390/ijms21197078>

ZINICOVSCAIA, Inga *et al.* Assessment of Air Pollution in Ulaanbaatar Using the Moss Bag Technique. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology (2024)** 86:152–164. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00244-024-01050-4>. Acesso em 17 de maio de 2024.

## 10. APÊNDICES

### Apêndice 1. Espécies estudadas com potencial bioindicador

|   | Espécie vegetal                 | Nome popular         | Poluente                                                                                                                                                                           | Alterações                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Autores                                                                           |
|---|---------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | <i>Artocarpus heterophyllus</i> | Jaqueira             | Monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, material particulado de 10 e 2,5 µm, arsênio, cádmio, cobalto, cromo, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo, selênio, vanádio e zinco. | Mudança na densidade dos estômatos e morfologia                                                                                                                                                                                                                                                                      | Ayu Rahmawati, Fadhilah Savana Nurun Nahari e Ovi Prasetya Winandari              |
| 2 | <i>Bauhinia forficata</i>       | Pata de vaca         | Ozônio                                                                                                                                                                             | Diminuição da taxa de clorofila e alteração da superfície foliar                                                                                                                                                                                                                                                     | Otávio Luiz Gusso Maioli, Jane Meri Santos, Neyval Costa Reis Júnior, et al.      |
| 3 | <i>Campomanesia xanthocarpa</i> | Guabiroba-a marelada | Dióxido de enxofre e dióxido de nitrogênio                                                                                                                                         | Degradação das folhas, aumento da biomassa e redução no teor de clorofila                                                                                                                                                                                                                                            | Renata F. Storch-Böhm, Cléder A. Somensi, Sylvie Cotelle, et al                   |
| 4 | <i>Casearia sylvestris</i>      | Guaçatonga           | Ozônio                                                                                                                                                                             | Manchas necróticas isoladas, clorose discreta e material particulado na margem das folhas, aumento na assimilação de CO <sub>2</sub> , acúmulo de partículas e descamação de ceras epicuticulares, intensa proliferação de hifas fúngicas, retração do protoplasto nos indivíduos e alteração no formato das células | Hugo Humberto de Araújo, Graciele Daiane Diniz Soares, Júlia Duarte Mendes, et al |
| 5 | <i>Ceiba speciosa</i>           | Paineira             | PM <sub>2,5</sub> e ozônio                                                                                                                                                         | elementos de vasos, fibras e raios mais curtos nas árvores                                                                                                                                                                                                                                                           | Thaís Jorge de Vasconcellos, Maura Da Cunha e Cátia Henriques Callado             |

|    |                             |                      |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                              |
|----|-----------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6  | <i>Cupania vernalis</i>     | Camboatá             | Dióxido de carbono, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre                                                                                       | Lesão foliar, diminuição da biomassa, redução do teor de clorofila                                                                                                                                                                      | Renata F. Storch-Bohm, Cleder A. Somensi, Renan C. Testolin, et al.                                                                                                          |
| 7  | <i>Eugenia uniflora</i>     | Pitanga              | Dióxido de enxofre, silício, enxofre, fósforo, cloro, potássio, cálcio, titânio, manganês, ferro, cobre, zinco, bromo, rubídio, estrôncio e chumbo. | necrose manchada, manchas arroxeadas nas folhas e aumento de novas folhas completamente arroxeadas, colapso total dos tecidos e redução da espessura da folha, obstrução dos estômatos                                                  | Laís de Almeida Bezerra, Cátia Henriques Callado, Thaís Jorge Vasconcellos, et al. Luzimar Campos da Silva, Talita Oliveira de Araújo, Advânio Inácio Siqueira-Silva, et al. |
| 8  | <i>Guarea guidonia</i>      | Carrapeta-verdadeira | Óxido nítrico, dióxido de carbono, metano e clorofluorcarbonetos                                                                                    | Menor diâmetro de vasos e fibras além de parênquima axial mais largo baixa condutividade hidráulica                                                                                                                                     | Daiane Barbosa da Silva, Thaís Jorge de Vasconcellos e Cátia Henriques Callado                                                                                               |
| 9  | <i>Guarea macrophylla</i>   | catiguá-morcego      | Ozônio                                                                                                                                              | Manchas necróticas isoladas em folhas coletadas alta quantidade de monoterpenos oxigenados, descamação de cera epicuticular e hifas fúngicas nas faces adaxial, flacidez das células epidérmicas ruptura celular na região dos tricomas | Hugo Humberto de Araújo, Graciele Daiane Diniz Soares, Júlia Duarte Mendes, et al                                                                                            |
| 10 | <i>Machaerium nyctitans</i> | Bico de pato         | Ozônio                                                                                                                                              | Danos visuais na lâmina foliar, taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> maiores, áreas com com degradação das ceras epicuticulares, hipertrofia de células do mesofilo e presença de                                                     | Hugo Humberto de Araújo, Graciele Daiane Diniz Soares, Júlia Duarte Mendes, et al                                                                                            |

|    |                                    |                |                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                      |
|----|------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                    |                |                                                                | protrusão da parede celular                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                      |
| 11 | <i>Parthenium hysterophorus</i> L. | Losna-branca   | Dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio e dióxido de carbono | Chumbo, cromo. Área foliar e crescimento do vegetal diminuiu. Atividade fotossintética. Redução do pecíolo das plantas, os estômatos reduziram e alteração na anatomia das folhas, número maior de estômatos, mas menores, índice de clorofila maior nas partes poluídas | Tufail Shakeel, Manzoor Hussain, Ghulam Mujtaba Shah, et al.                         |
| 12 | <i>Psidium guajava</i> L.          | Goiabeira      | Ozônio                                                         | Lesões foliares visíveis, variação no crescimento e biomassa                                                                                                                                                                                                             | Ricardo Keiichi Nakazato, Marisia Pannia Esposito, Poliana Cardoso-Gustavson, et al. |
| 13 | <i>Psidium guineense</i> Sw.       | Araçá do campo | Dióxido de enxofre                                             | Lesões visuais e necroses acastanhadas, bordas estomáticas flácidas, perda de turgor e colapso celular, cavidades secretoras deformadas                                                                                                                                  | Luzimar Campos da Silva, Larisse de Freitas-Silva, Diego Ismael Rocha, et al.        |
| 14 | <i>Tibouchina granulosa</i>        | Quaresmeira    | Material particulado                                           | Diferenças no número de estomas e tricomas, menor índice de água                                                                                                                                                                                                         | Maria Cristina Tessari Zampieri                                                      |

## Apêndice 2. Internação circulatório - maiores de 60 anos

Coefficients:

```

                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  4.196e-01  3.514e-02  11.939 1.99e-14 ***
AnoB         -2.445e-02  2.199e-02  -1.112  0.27322
AnoC          2.858e-02  2.439e-02   1.172  0.24865
AnoD          6.772e-02  2.679e-02   2.528  0.01575 *
AnoE          5.489e-02  3.146e-02   1.745  0.08915 .

```

|        |            |           |        |            |
|--------|------------|-----------|--------|------------|
| Mesago | 8.019e-02  | 4.794e-02 | 1.673  | 0.10262    |
| Mesdez | 9.260e-02  | 4.274e-02 | 2.166  | 0.03663 *  |
| Mesfev | 1.242e-02  | 4.488e-02 | 0.277  | 0.78346    |
| Mesjan | 4.415e-02  | 4.304e-02 | 1.026  | 0.31149    |
| Mesjul | 3.070e-02  | 5.646e-02 | 0.544  | 0.58981    |
| Mesjun | -5.714e-05 | 6.638e-02 | -0.001 | 0.99932    |
| Mesmai | 3.066e-02  | 4.675e-02 | 0.656  | 0.51587    |
| Mesmar | 3.195e-02  | 3.625e-02 | 0.881  | 0.38373    |
| Mesnov | 8.273e-02  | 4.200e-02 | 1.970  | 0.05617 .  |
| Mesout | 1.271e-01  | 3.665e-02 | 3.468  | 0.00132 ** |
| Messet | 9.447e-02  | 4.016e-02 | 2.353  | 0.02393 *  |
| Temp   | 7.317e-03  | 1.584e-02 | 0.462  | 0.64673    |
| NO     | 2.137e-02  | 2.436e-02 | 0.877  | 0.38577    |
| NO2    | 5.927e-03  | 1.540e-02 | 0.385  | 0.70253    |
| NOX    | -5.041e-03 | 2.471e-02 | -0.204 | 0.83944    |
| O3     | 2.959e-04  | 1.314e-02 | 0.023  | 0.98216    |
| MP10   | 8.061e-03  | 2.210e-02 | 0.365  | 0.71733    |

### Apêndice 3. Internação respiratório - maiores de 60 anos

```
glm(formula = Inter_resp ~ Ano + Mes + Tem + NO + NO2 + NOX +
      O3 + MP10, family = gaussian(identity), data = data)
```

Coefficients:

|             | Estimate  | Std. Error | t value | Pr(> t ) |
|-------------|-----------|------------|---------|----------|
| (Intercept) | 0.055774  | 0.074997   | 0.744   | 0.462    |
| AnoB        | -0.012262 | 0.015797   | -0.776  | 0.443    |
| AnoC        | 0.007239  | 0.022225   | 0.326   | 0.747    |
| AnoD        | -0.012912 | 0.022414   | -0.576  | 0.568    |

|        |           |          |        |         |
|--------|-----------|----------|--------|---------|
| AnoE   | 0.024962  | 0.025806 | 0.967  | 0.340   |
| Mesago | -0.011418 | 0.036693 | -0.311 | 0.757   |
| Mesdez | 0.034294  | 0.029952 | 1.145  | 0.260   |
| Mesfev | -0.003027 | 0.031382 | -0.096 | 0.924   |
| Mesjan | 0.038652  | 0.030217 | 1.279  | 0.209   |
| Mesjul | -0.046901 | 0.043031 | -1.090 | 0.283   |
| Mesjun | -0.052100 | 0.051639 | -1.009 | 0.320   |
| Mesmai | -0.023346 | 0.035626 | -0.655 | 0.516   |
| Mesmar | -0.004133 | 0.024945 | -0.166 | 0.869   |
| Mesnov | 0.006601  | 0.031261 | 0.211  | 0.834   |
| Mesout | 0.009409  | 0.027873 | 0.338  | 0.738   |
| Messet | -0.007721 | 0.034464 | -0.224 | 0.824   |
| Tem    | -0.004848 | 0.011952 | -0.406 | 0.687   |
| NO     | 0.018172  | 0.019078 | 0.952  | 0.347   |
| NO2    | 0.029568  | 0.016411 | 1.802  | 0.080 . |
| NOX    | 0.013062  | 0.018983 | 0.688  | 0.496   |
| O3     | 0.017140  | 0.014636 | 1.171  | 0.249   |
| MP10   | -0.024858 | 0.016087 | -1.545 | 0.131   |

#### Apêndice 4. Mortalidade circulatório - maiores de 60 anos

```
glm(formula = Mort ~ Ano + Mes + Tem + NO + NO2 + NOX + O3 +
      MP10, family = gaussian(identity), data = data)
```

Coefficients:

|             | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |    |
|-------------|------------|------------|---------|----------|----|
| (Intercept) | 0.0454729  | 0.0141165  | 3.221   | 0.00271  | ** |
| AnoB        | -0.0052803 | 0.0064602  | -0.817  | 0.41910  |    |
| AnoC        | -0.0039827 | 0.0091103  | -0.437  | 0.66461  |    |
| AnoD        | -0.0074979 | 0.0092983  | -0.806  | 0.42532  |    |

|        |            |           |        |           |
|--------|------------|-----------|--------|-----------|
| AnoE   | -0.0071911 | 0.0106236 | -0.677 | 0.50280   |
| Mesago | -0.0061725 | 0.0152061 | -0.406 | 0.68720   |
| Mesdez | 0.0200406  | 0.0123499 | 1.623  | 0.11337   |
| Mesfev | 0.0109700  | 0.0129377 | 0.848  | 0.40209   |
| Mesjan | 0.0237231  | 0.0122998 | 1.929  | 0.06168 . |
| Mesjul | -0.0072760 | 0.0178140 | -0.408 | 0.68537   |
| Mesjun | -0.0243071 | 0.0213284 | -1.140 | 0.26196   |
| Mesmai | 0.0009115  | 0.0147148 | 0.062  | 0.95095   |
| Mesmar | 0.0096877  | 0.0102866 | 0.942  | 0.35258   |
| Mesnov | 0.0125075  | 0.0128496 | 0.973  | 0.33686   |
| Mesout | 0.0141828  | 0.0114554 | 1.238  | 0.22370   |
| Messet | -0.0053849 | 0.0141607 | -0.380 | 0.70598   |
| Tem    | -0.0041675 | 0.0045084 | -0.924 | 0.36144   |
| NO     | 0.0072254  | 0.0078946 | 0.915  | 0.36616   |
| NO2    | 0.0081821  | 0.0067440 | 1.213  | 0.23294   |
| NOX    | 0.0007506  | 0.0080328 | 0.093  | 0.92607   |
| O3     | 0.0021565  | 0.0059546 | 0.362  | 0.71935   |
| MP10   | -0.0012785 | 0.0066397 | -0.193 | 0.84839   |

## Apêndice 5. Mortalidade respiratório - maiores de 60 anos

```
glm(formula = Mort ~ Ano + Mes + Tem + NO + NO2 + NOX + O3 +
      MP10, family = gaussian(identity), data = data)
```

Coefficients:

|             | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t ) |    |
|-------------|------------|------------|---------|----------|----|
| (Intercept) | 0.0464067  | 0.0136402  | 3.402   | 0.00165  | ** |
| AnoB        | -0.0073596 | 0.0064582  | -1.140  | 0.26199  |    |
| AnoC        | -0.0056111 | 0.0090862  | -0.618  | 0.54077  |    |
| AnoD        | -0.0090963 | 0.0091635  | -0.993  | 0.32750  |    |

|        |            |           |        |           |
|--------|------------|-----------|--------|-----------|
| AnoE   | -0.0087469 | 0.0105501 | -0.829 | 0.41252   |
| Mesago | -0.0058445 | 0.0150012 | -0.390 | 0.69912   |
| Mesdez | 0.0201467  | 0.0122454 | 1.645  | 0.10863   |
| Mesfev | 0.0106212  | 0.0128300 | 0.828  | 0.41321   |
| Mesjan | 0.0219056  | 0.0123534 | 1.773  | 0.08465 . |
| Mesjul | -0.0077566 | 0.0175923 | -0.441 | 0.66192   |
| Mesjun | -0.0255824 | 0.0211117 | -1.212 | 0.23350   |
| Mesmai | 0.0003253  | 0.0145651 | 0.022  | 0.98230   |
| Mesmar | 0.0097075  | 0.0101983 | 0.952  | 0.34751   |
| Mesnov | 0.0133013  | 0.0127804 | 1.041  | 0.30493   |
| Mesout | 0.0149273  | 0.0113951 | 1.310  | 0.19850   |
| Messet | -0.0041975 | 0.0140898 | -0.298 | 0.76749   |
| Tem    | -0.0041005 | 0.0044629 | -0.919 | 0.36431   |
| NO     | 0.0076741  | 0.0077997 | 0.984  | 0.33174   |
| NO2    | 0.0076914  | 0.0067092 | 1.146  | 0.25920   |
| NOX    | 0.0006584  | 0.0077834 | 0.085  | 0.93305   |
| O3     | 0.0013491  | 0.0059861 | 0.225  | 0.82297   |
| MP10   | -0.0010075 | 0.0065770 | -0.153 | 0.87910   |

## Apêndice 6. Internação respiratório - menores de 4 anos

```
glm(formula = Inter_resp ~ Ano + Mes + Tem + NO + NO2 + NOX +
      O3 + MP10, family = gaussian(identity), data = data)
```

Coefficients:

|             | Estimate  | Std. Error | t value | Pr(> t )   |
|-------------|-----------|------------|---------|------------|
| (Intercept) | 0.0546973 | 0.0504253  | 1.085   | 0.28526    |
| AnoB        | 0.0220304 | 0.0107855  | 2.043   | 0.04847 *  |
| AnoC        | 0.0538217 | 0.0152099  | 3.539   | 0.00113 ** |
| AnoD        | 0.0537800 | 0.0155237  | 3.464   | 0.00139 ** |



|        |            |           |        |         |   |
|--------|------------|-----------|--------|---------|---|
| AnoE   | 0.0327131  | 0.0177363 | 1.844  | 0.07336 | . |
| Mesago | 0.0356146  | 0.0253869 | 1.403  | 0.16922 |   |
| Mesdez | -0.0001849 | 0.0206184 | -0.009 | 0.99289 |   |
| Mesfev | 0.0012424  | 0.0215997 | 0.058  | 0.95445 |   |
| Mesjan | -0.0128819 | 0.0205348 | -0.627 | 0.53441 |   |
| Mesjul | 0.0090799  | 0.0297409 | 0.305  | 0.76190 |   |
| Mesjun | 0.0147012  | 0.0356082 | 0.413  | 0.68216 |   |
| Mesmai | 0.0238566  | 0.0245666 | 0.971  | 0.33798 |   |
| Mesmar | 0.0142297  | 0.0171737 | 0.829  | 0.41280 |   |
| Mesnov | 0.0097983  | 0.0214526 | 0.457  | 0.65060 |   |
| Mesout | 0.0189801  | 0.0191250 | 0.992  | 0.32761 |   |
| Messet | 0.0429831  | 0.0236415 | 1.818  | 0.07737 | . |
| Tem    | -0.0023781 | 0.0082413 | -0.289 | 0.77457 |   |
| NO     | 0.0329003  | 0.0131802 | 2.496  | 0.01727 | * |
| NO2    | -0.0066128 | 0.0112593 | -0.587 | 0.56066 |   |
| NOX    | -0.0239818 | 0.0133717 | -1.793 | 0.08130 | . |
| O3     | 0.0029456  | 0.0099374 | 0.296  | 0.76862 |   |
| MP10   | -0.0054953 | 0.0110850 | -0.496 | 0.62309 |   |