

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIDADES INTELIGENTES E
SUSTENTÁVEIS**

GABRIEL TIEPPO GONÇALVES CAMACHO

**RELAÇÃO ENTRE A EXPOSIÇÃO A POLUENTES E INTERNAÇÕES POR
DOENÇAS RESPIRATÓRIAS CRÔNICAS EM RESIDENTES DE SÃO
CAETANO DO SUL – SP.**

SÃO PAULO

2026

GABRIEL TIEPPO GONÇALVES CAMACHO

**RELAÇÃO ENTRE A EXPOSIÇÃO A POLUENTES E INTERNAÇÕES POR
DOENÇAS RESPIRATÓRIAS CRÔNICAS EM RESIDENTES DE SÃO CAETANO
DO SUL – SP.**

**Relationship between pollutant exposure and hospitalizations for chronic
respiratory diseases among residents of São Caetano do Sul, São Paulo.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como parte do requisito à obtenção do grau de Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis.

Aluno: Gabriel Tieppo Gonçalves Camacho

Orientadora: Profa. Dra. Alessandra Cristina Guedes Pellini

SÃO PAULO

2026

Camacho, Gabriel Tieppo Gonçalves.

Relação entre a exposição a poluentes e internações por doenças respiratórias crônicas em residentes de São Caetano do Sul – SP. / Gabriel Tieppo Gonçalves Camacho. 2026.

112 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2026.

Orientador (a): Prof^a. Dr^a. Alessandra Cristina Guedes Pellini.

1. Doença pulmonar obstrutiva crônica. 2. Poluição do ar. 3. Estudos de séries temporais. 4. São Caetano do Sul. 5. Gestão de saúde pública.

I. Pellini, Alessandra Cristina Guedes. II. Título.

CDU 711.4

**“RELAÇÃO ENTRE A EXPOSIÇÃO A POLUENTES E INTERNAÇÕES POR
DOENÇAS RESPIRATÓRIAS CRÔNICAS EM RESIDENTES DE SÃO CAETANO
DO SUL – SP.”**

POR

GABRIEL TIEPPO GONÇALVES CAMACHO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis.

Profa. Dra. Alessandra Cristina Guedes Pellini – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Profa. Dra. Andrezza Portella Ribeiro – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Prof. Dr. Eduardo Shimoda – Universidade Cândido Mendes – UCAM

São Paulo, agosto de 2026.

RESUMO

Introdução: A região do ABC Paulista, em São Paulo, enfrenta desafios de desenvolvimento urbano sustentável, onde o progresso econômico e social coexistem com pressões ambientais e de saúde pública. São Caetano do Sul (SCS), apesar de seu alto Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,862, não está imune aos desafios da poluição atmosférica, devido à sua frota veicular e parque industrial expressivos. A poluição do ar, especialmente o material particulado (MP), tem sido associada a efeitos deletérios na saúde respiratória, afetando principalmente crianças e idosos. Este estudo visa investigar a relação entre a poluição do ar e as internações por doenças respiratórias crônicas em São Caetano do Sul, um município com características únicas de alto IDH e desafios ambientais significativos. **Objetivo:** Compreender como a poluição do ar (MP_{10} , O_3 , NO_2) se relacionou à prevalência por doenças respiratórias crônicas ao longo dos anos de 2010 a 2023 em São Caetano do Sul (SP). **Métodos:** Este estudo longitudinal de série temporal utiliza dados secundários agregados de 2010 a 2023. Os dados de poluição atmosférica foram obtidos da CETESB, enquanto os dados de internações por doenças respiratórias crônicas (asma, DPOC e DRC) foram coletados do DATASUS. Calcularam-se as frequências mensais de internação, estratificadas por sexo, faixa etária e tipo de doença. A análise estatística incluiu análise descritiva, correlação e análise de séries temporais para identificar tendências e sazonalidades. Os *softwares* utilizados foram Microsoft Excel e Google Colab. **Resultados:** Em perspectiva anual, há uma correlação positiva de moderada a forte entre a taxa de internações por Asma e Doenças Respiratórias Crônicas (DRC) e os níveis de Material Particulado (MP_{10}) e Dióxido de Nitrogênio (NO_2) em São Caetano do Sul, destacando-se a associação de longo prazo entre a Asma e o NO_2 ($r = 0,6295$). Em contraste, as análises de base mensal revelaram alta volatilidade e flutuações sazonais inconsistentes potencialmente causadas pela influência moduladora de fatores climáticos (como a inversão térmica no inverno), enquanto o Ozônio (O_3) apresentou correlações fracas e predominantemente negativas. Por fim, identificou-se uma mínima histórica de internações por DRC no ano de 2020 (79 casos), configurando um “experimento natural” que comprova como o isolamento social e a redução da mobilidade urbana fóssil durante a pandemia de COVID-19 geraram um alívio epidemiológico imediato e mensurável para a saúde pública municipal.

Palavras-chave: Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica, Poluição do Ar, Estudos de Séries Temporais, São Caetano do Sul, Gestão de Saúde Pública.

ABSTRACT

Introduction: The ABC Paulista region in São Paulo faces challenges regarding sustainable urban development, where economic and social progress coexist with environmental and public health pressures. Despite its high Human Development Index (HDI) of 0.862, São Caetano do Sul (SCS) is not immune to the challenges of air pollution, given its substantial vehicle fleet and industrial sector. Air pollution—specifically particulate matter (PM)—has been linked to adverse respiratory health effects, primarily affecting children and the elderly. This study aims to investigate the relationship between air pollution and hospitalizations for chronic respiratory diseases in São Caetano do Sul, a municipality characterized by both a high HDI and significant environmental challenges. **Objective:** To understand the relationship between air pollution (PM₁₀, O₃, NO₂) and the prevalence of chronic respiratory diseases between 2010 and 2023 in São Caetano do Sul (SP). **Methods:** This longitudinal time-series study utilizes aggregated secondary data from 2010 to 2023. Air pollution data were obtained from CETESB, while data on hospitalizations for chronic respiratory diseases (asthma, COPD, and CRD) were collected from DATASUS. Monthly hospitalization frequencies were calculated and stratified by sex, age group, and disease type. Statistical analysis included descriptive statistics, correlation analysis, and time-series analysis to identify trends and seasonality. Microsoft Excel and Google Colab were used for the analysis. **Results:** On an annual basis, there is a moderate-to-strong positive correlation between hospitalization rates for asthma and chronic respiratory diseases (CRD) and levels of particulate matter (PM₁₀) and nitrogen dioxide (NO₂) in São Caetano do Sul, with a notable long-term association between asthma and NO₂ ($r = 0.6295$). In contrast, monthly analyses revealed high volatility and inconsistent seasonal fluctuations—potentially driven by the modulating influence of climatic factors (such as winter thermal inversions)—while ozone (O₃) showed weak and predominantly negative correlations. Finally, a historical low in CRD hospitalizations was observed in 2020 (79 cases), constituting a “natural experiment” that demonstrates how social isolation and reduced urban mobility reliant on fossil fuels during the COVID-19 pandemic resulted in immediate, measurable epidemiological relief for municipal public health.

Keywords: Pulmonary Disease, Chronic Obstructive, Air Pollution, Time Series Studies, São Caetano do Sul, Public Health Management.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	18
1.2 PROBLEMA E QUESTÃO DE PESQUISA.....	20
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	20
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	20
1.4 JUSTIFICATIVA.....	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1 DOENÇA PULMONAR OBSTRUTIVA CRÔNICA (DPOC): UM DESAFIO GLOBAL EM CONTEXTOS URBANOS.....	22
2.1.1 <i>Epidemiologia e Impacto Global da DPOC</i>	23
2.1.2 <i>Fisiopatologia e Manifestações Clínicas da DPOC</i>	23
2.1.3 <i>Fatores de Risco no Ambiente Urbano</i>	24
2.1.4 <i>DPOC e Cidades Inteligentes: Perspectivas Inovadoras</i>	25
2.1.5 <i>Conclusão do Capítulo</i>	26
2.2 RELAÇÃO ENTE POLUENTES, CLIMA E DOENÇAS RESPIRATÓRIAS.....	26
2.3 O IMPACTO DA INDUSTRIALIZAÇÃO E URBANIZAÇÃO NOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	28
2.3.1 <i>O Impacto da Industrialização e Urbanização nos Poluentes Atmosféricos Específicos</i>	29
2.3.2 <i>O Crescimento da Frota Veicular e a Industrialização Brasileira</i>	30
2.3.3 <i>Política de Controle de Poluentes em São Caetano do Sul: Avanços e Desafios</i>	32
2.4 CIDADES INTELIGENTES E SUSTENTÁVEIS: UM ENFOQUE INTEGRADO EM POLUIÇÃO SAÚDE PÚBLICA, ODS E NORMAS ISO.....	32
2.5 ESTUDOS SOBRE A RELAÇÃO ENTRE EXPOSIÇÃO A POLUENTES E DESFECHOS EM SAÚDE.....	34

3 MÉTODOS.....	41
3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	41
3.2 ÁREA DO ESTUDO.....	41
3.3 POPULAÇÃO E PERÍODO DO ESTUDO.....	45
3.4 FONTES DE DADOS E PROCEDIMENTOS DE COLETA.....	45
3.5 PROCEDIMENTOS DE TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS.....	46
3.5.1 <i>Preparação dos Dados</i>	46
3.5.2 <i>Etapa Descritiva</i>	46
3.5.3 <i>Análise de Correlação</i>	47
3.5.4 <i>Análise de Séries Temporais</i>	47
3.5.5 <i>Análise de Causalidade de Granger</i>	48
3.5.6 <i>Softwares Utilizados na Pesquisa</i>	48
3.6 CONSIDERAÇÕES ÉTICAS.....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS INTERNAÇÕES POR DOENÇAS RESPIRATÓRIAS CRÔNICAS EM SÃO CAETANO DO SUL.....	49
4.1.1 <i>Internações por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC)</i>	49
4.1.2 <i>Internações por Asma</i>	51
4.1.3 <i>Internações por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC)</i>	55
4.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS POLUENTES AMBIENTAIS EM SÃO CAETANO DO SUL.....	58
4.2.1 <i>Material Particulado 10 (MP₁₀)</i>	58
4.2.2 <i>Dióxido de Nitrogênio (NO₂)</i>	60
4.2.3 <i>Ozônio (O₃)</i>	62
4.3 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E INTERNAÇÕES POR DOENÇAS RESPIRATÓRIAS EM SÃO CAETANO DO SUL.....	63
4.3.1 <i>Análise Descritiva e Testes de Normalidade</i>	64
4.3.2 <i>Correlação entre Taxas de Internação por DRC e Níveis de Material Particulado 10 (MP₁₀)</i>	67

4.3.3 Correlação entre Taxas de Internação por DRC e Níveis de Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	69
4.3.4 Correlação entre Taxas de Internação por DRC e Níveis de Ozônio (O_3)	70
4.3.5 Correlação entre Taxas de Internação por Asma e Níveis de Material Particulado 10 (MP_{10})	71
4.3.6 Correlação entre Taxa de Internação por Asma e Níveis de Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	73
4.3.7 Correlação entre Taxas de Internação por Asma e Níveis de Ozônio (O_3)	74
4.3.8 Correlação entre Taxas de Internação por DPOC e Níveis de Material Particulado 10 (MP_{10})	75
4.3.9 Correlação entre Taxa de Internação por DPOC e Níveis de Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	77
4.3.10 Correlação entre Taxas de Internação por DPOC e Níveis de Ozônio (O_3)	78
4.4 AS CORRELAÇÕES LINEARES E SUAS APLICAÇÕES.....	79
4.4.1 A Dinâmica dos Poluentes Atmosféricos e a Saúde Respiratória a Longo Prazo: Mecanismos e Evidências.....	80
4.4.2 A Volatilidade Mensal e o Papel Modulador das Variáveis Microclimáticas.....	81
4.4.3 O Paradoxo do Ozônio (O_3): Efeito de Titulação e Interações Não Lineares.....	81
4.4.4 O Experimento Natural de 2020: Consequências do Distanciamento Social na Saúde Respiratória.....	82
4.4.5 Interfaces com Cidades Inteligentes, Gestão Hospitalar e o Custo para o Sistema Único de Saúde.....	83
4.4.6 Alinhamento com a Agenda Internacional: Normas ISO e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	84
4.4.7 Considerações Finais sobre as Análises de Correlação Linear.....	84
4.5 A FALHA DAS CORRELAÇÕES LINEARES E A BUSCA PELOS EFEITOS TEMPORAIS.....	86
4.5.1 Análises dos Efeitos de Atraso (lag).....	86
4.5.2 Interpretação dos Gráficos de p-valores do Teste de Causalidade de Granger.....	86
4.5.3 Teste de Causalidade de Granger entre Ozônio e internações por DRC (Ozônio causa Granger DRC) e entre internações por DRC e Ozônio (DRC causa Granger Ozônio)	86

4.5.4	<i>Teste de Causalidade de Granger entre Dióxido de Nitrogênio e interações por DRC (NO₂ causa Granger DRC) e entre interações por DRC e Dióxido de Nitrogênio (DRC causa Granger NO₂)</i>	87
4.5.5	<i>Teste de Causalidade de Granger entre Material Particulado 10 e interações por DRC (MP₁₀ causa Granger DRC) e entre interações por DRC e Dióxido de Material Particulado 10 (DRC causa Granger MP₁₀)</i>	88
4.5.6	<i>Teste de Causalidade de Granger entre Ozônio e interações por Asma (Ozônio causa Granger Asma) e entre interações por Asma e Ozônio (Asma causa Granger Ozônio)</i>	89
4.5.7	<i>Teste de Causalidade de Granger entre Dióxido de Nitrogênio e interações por Asma (NO₂ causa Granger Asma) e entre interações por Asma e Dióxido de Nitrogênio (Asma causa Granger NO₂)</i>	90
4.5.8	<i>Teste de Causalidade de Granger entre Material Particulado 10 e interações por Asma (MP₁₀ causa Granger Asma) e entre interações por Asma e Dióxido de Material Particulado 10 (Asma causa Granger MP₁₀)</i>	91
4.5.9	<i>Teste de Causalidade de Granger entre Ozônio e interações por DPOC (Ozônio causa Granger DPOC) e entre interações por DPOC e Ozônio (DPOC causa Granger Ozônio)</i>	92
4.5.10	<i>Teste de Causalidade de Granger entre Dióxido de Nitrogênio e interações por DPOC (NO₂ causa Granger DPOC) e entre interações por DPOC e Dióxido de Nitrogênio (DPOC causa Granger NO₂)</i>	93
4.5.11	<i>Teste de Causalidade de Granger entre Material Particulado 10 e interações por DPOC (MP₁₀ causa Granger DPOC) e entre interações por DPOC e Dióxido de Material Particulado 10 (DPOC causa Granger MP₁₀)</i>	94
4.5.12	<i>Adequação do Teste de Causalidade de Granger à Realidade dos Poluentes das Cidades</i>	95
4.6	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	99
5	CONCLUSÕES	100
6	REFERÊNCIAS	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\bar{x}$ – média

μm – micrômetro

dp – desvio-padrão

km/h – quilômetro por hora

km^2 – quilômetro quadrado

p – valor de p

r – coeficiente de correlação de *Pearson*

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ – microgramas por metro cúbico

ρ – coeficiente de correlação de *Spearman*

ADF – *Augmented Dickey-Fuller* (Teste Estatístico de *Dickey-Fuller* Aumentado)

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

APHA – *American Public Health Association*

ARIMA – *Autoregressive Integrated Moving Average*

CEBRAP – Centro Brasileiro de Análise e Planejamento

CEP – Comitê de Ética em Pesquisa

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CID-10 – Classificação Internacional de Doenças, 10ª edição

CIS – Cidades Inteligentes e Sustentáveis

CN – Carbono Negro

CNI – Confederação Nacional da Indústria

CNM – Confederação Nacional de Municípios

CNS – Conselho Nacional de Saúde

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

DALY – *Disability Adjusted Life Years*

DATASUS – Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

DPOC – Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica

DRC – Doenças Respiratórias Crônicas

EEA – *European Environment Agency*

ELAPSE – *Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe*

EPA – *Environmental Protection Agency*

ESP – Estado de São Paulo

EUA – Estados Unidos da América

GAM – Modelos Aditivos Generalizados

GEE – Gases de Efeito Estufa

GEx-CIM – Grupo Executivo do Comitê Interministerial de Mudança do Clima

HDI – *Human Development Index*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDEB – Índice de Desenvolvimento da Educação Básica

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

IDHM – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal

IDSC-BR – Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades – Brasil

IFDM – Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal

INEP – Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira

IoT – *Internet of Things* (Internet das Coisas)

ISO – *International Organization for Standardization*

ITU – *International Telecommunication Union*

KPSS – *Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin* (Teste Estatístico)

K-S – *Kolmogorov-Smirnov*

LGPD – Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais

LSTM – *Long Short-Term Memory*

MAPLE – *Mortality-Air Pollution Associations in Low Exposure Environments*

MME – Ministério de Minas e Energia

MP – Material Particulado

MP₁₀ – Material Particulado Inalável

MP_{2,5} – Material Particulado Fino

NO₂ – Dióxido de Nitrogênio

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

O₃ – Ozônio

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

PIB – Produto Interno Bruto

PM – *Particulate Matter*

PMSCS – Prefeitura Municipal de São Caetano do Sul

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

Q-Q Plot – Gráfico Quantil-Quantil

QUALAR – Sistema de Informações da Qualidade do Ar

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

RNN – Redes Neurais Recorrentes

RR – Risco Relativo

SCS – São Caetano do Sul

SDSN – *Sustainable Development Solutions Network*

SEADE (Fundação) – Sistema Estadual de Análise de Dados

SESAUD – Secretaria da Saúde de São Caetano do Sul

SIH-SUS – Sistema de Informações Hospitalares do SUS,

SO₂ – Dióxido de Enxofre

SP – São Paulo

SUS – Sistema Único de Saúde

S-W – *Shapiro-Wilk*

TIC – Tecnologias da Informação e Comunicação

TMI – Taxa de Mortalidade Infantil

TSE – Tribunal Superior Eleitoral

UN – *United Nations*

UNEP – *United Nations Environment Programme*

UN-Habitat – Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos

WHO – *World Health Organization*

LISTA DE FIGURAS, GRÁFICOS E TABELAS

<i>Figura 1</i> - Localização do município de São Caetano do Sul na Região Metropolitana de São Paulo.....	42
<i>Figura 2</i> - Evolução das taxas de internação por DRC no sexo masculino (por 100.000 homens), sexo feminino (por 100.000 mulheres) e total (por 100.000 habitantes) segundo ano da internação. São Caetano do Sul, 2010-2023.....	51
<i>Figura 3</i> - Evolução das taxas de internação por asma no sexo feminino (por 100.000 mulheres), segundo faixa etária e ano da internação. São Caetano do Sul, 2010-2023.....	52
<i>Figura 4</i> - Evolução das taxas de internação por asma no sexo masculino (por 100.000 homens), segundo faixa etária e ano da internação. São Caetano do Sul, 2010-2023.....	52
<i>Figura 5</i> - Evolução das taxas de internação por asma no sexo masculino (por 100.000 homens), sexo feminino (por 100.000 mulheres) e total (por 100.000 habitantes) segundo ano da internação. São Caetano do Sul, 2010-2023.....	53
<i>Figura 6</i> - Evolução das taxas de internação por DPOC no sexo feminino (por 100.000 mulheres), segundo faixa etária e ano da internação. São Caetano do Sul, 2010-2023.....	55
<i>Figura 7</i> - Evolução das taxas de internação por DPOC no sexo masculino (por 100.000 mulheres), segundo faixa etária e ano da internação. São Caetano do Sul, 2010-2023.....	56
<i>Figura 8</i> - Evolução das taxas de internação por DPOC no sexo masculino (por 100.000 homens), sexo feminino (por 100.000 mulheres) e total (por 100.000 habitantes) segundo ano da internação. São Caetano do Sul, 2010-2023.....	56
<i>Figura 9</i> - Valores médios mensais de Material Particulado 10 (MP10). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....	60
<i>Figura 10</i> – Valores médios mensais de Dióxido de Nitrogênio (NO ₂). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....	61
<i>Figura 11</i> – Valores médios mensais de Ozônio (O ₃). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....	63
<i>Figura 12</i> - Q-Q Plot e Histograma de O ₃ . São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....	64
<i>Figura 13</i> - Q-Q Plot e Histograma das taxas internações por Doença Respiratória Crônica (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....	65
<i>Figura 14</i> - Q-Q Plot e Histograma do Material Particulado 10 (MP ₁₀). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....	65
<i>Figura 15</i> - Q-Q Plot e Histograma do Dióxido de Nitrogênio (NO ₂). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....	66

<i>Figura 16 - Q-Q Plot e Histograma das taxas internações por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 17 - Q-Q Plot e Histograma das taxas internações por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 18 - Correlação de Spearman mensal entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 19 - Correlação de Spearman anual entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 20 - Correlação de Spearman mensal entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 21 - Correlação de Spearman anual entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 22 - Correlação de Spearman mensal entre Ozônio (O₃) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 23 - Correlação de Spearman anual entre Ozônio (O₃) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 24 - Correlação de Spearman mensal entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 25 - Correlação de Spearman anual entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 26 - Correlação de Spearman mensal entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 27 - Correlação de Spearman anual entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 28 - Correlação de Spearman mensal entre Ozônio (O₃) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 29 - Correlação de Spearman anual entre Ozônio (O₃) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>75</i>

<i>Figura 30 - Correlação de Spearman mensal entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 31 - Correlação de Spearman anual entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 32 - Correlação de Spearman mensal entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 33 - Correlação de Spearman anual entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 34 - Correlação de Spearman mensal entre Ozônio (O₃) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 35 - Correlação de Spearman anual entre Ozônio (O₃) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 36 - Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre Ozônio e internações por DRC.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 37 - Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre NO₂ e internações por DRC.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 38 - Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre MP₁₀ e internações por DRC.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 39 - Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre Ozônio e internações por Asma.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 40 - Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre NO₂ e internações por Asma.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 41 - Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre MP₁₀ e internações por Asma.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 42 - Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre Ozônio e internações por DPOC.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 43 - Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre NO₂ e internações por DPOC.....</i>	<i>94</i>

<i>Figura 44 - Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre MP_{10} e internações por DPOC.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 45 - Mapa de calor: p-valores dos testes de causalidade de Granger.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 1 - Casos registrados de internações por DRC segundo mês e ano de internação em hospitais do sistema público de saúde de São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 2 - Resumo das tendências e médias anuais de internações por DRC por períodos. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 3 - Casos registrados de internações por asma segundo mês e ano de internação em hospitais do sistema público de saúde de São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 4 - Resumo das tendências e médias anuais de internações por asma por períodos. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 5 - Casos registrados de internações por DPOC segundo mês e ano de internação em hospitais do sistema público de saúde de São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 6 - Resumo das tendências e médias anuais de internações por DPOC por períodos. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 7 - Valores médios mensais de Material Particulado 10 (MP_{10}) segundo mês e ano. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 8 - Valores médios mensais de Dióxido de Nitrogênio (NO_2) segundo mês e ano. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 9 - Valores médios mensais de Ozônio (O_3) segundo mês e ano. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 10 - Estatística descritiva e testes de normalidade dos poluentes ambientais e doenças respiratórias crônicas. São Caetano do Sul, 2010 a 2023.....</i>	<i>67</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A região do ABC Paulista, localizada no estado de São Paulo, representa um microcosmo dos desafios e oportunidades enfrentados pelas áreas metropolitanas brasileiras no contexto do desenvolvimento urbano sustentável. Composta por sete municípios – Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra – essa região exemplifica o fenômeno da conurbação, onde as fronteiras municipais se tornam indistintas devido à continuidade da malha urbana. Segundo dados atualizados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [IBGE], 2024), a população da região ultrapassou 2,8 milhões de habitantes em 2021, consolidando sua posição como o terceiro maior mercado do Brasil, atrás apenas de Rio de Janeiro e São Paulo (FERREIRA, 2005; IBGE, 2024).

Nesse contexto, São Caetano do Sul (SCS) emerge como um caso paradigmático de desenvolvimento urbano bem-sucedido, ao menos sob a ótica dos indicadores convencionais. O município ostenta o mais alto Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) entre todas as 5.570 cidades brasileiras, de 0,862, segundo o Atlas Brasil (IBGE, 2022). Essa posição de liderança, mantida em pelo menos três avaliações consecutivas, reflete um desempenho excepcional nos pilares de renda, longevidade e educação. Além disso, a cidade tem se destacado em *rankings* de sustentabilidade, sugerindo uma abordagem mais holística ao desenvolvimento urbano que vai além dos indicadores socioeconômicos tradicionais (PROGRAMA CIDADES SUSTENTÁVEIS, 2022).

Entretanto, como observado por Caiaffa e Friche (2012), o processo de urbanização acelerada traz consigo uma série de desafios ecológicos e sociais. O “viver urbano” impõe pressões significativas sobre o meio ambiente e a saúde pública, manifestando-se por meio de mudanças demográficas, psicossociais, materiais e nos padrões de consumo. Entre essas pressões, a poluição atmosférica emerge como uma preocupação central, devido ao seu impacto direto na saúde respiratória da população.

São Caetano do Sul, apesar de seu alto IDH, não está imune a esses desafios. O município possui uma frota veicular e um parque industrial expressivos, ambas importantes fontes de emissão de poluentes atmosféricos (DALLA, 2011). Essa realidade coloca em

evidência a complexidade do desenvolvimento urbano sustentável, em que o progresso econômico e social precisa ser equilibrado com a preservação ambiental e a saúde pública.

Entre os poluentes mais preocupantes está o material particulado (MP), uma mistura complexa de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar, compostas por substâncias orgânicas e inorgânicas (OLIVEIRA, 2011). A diversidade de tamanho, forma, composição e origem dessas partículas reflete a multiplicidade de fontes de emissão presentes no ambiente urbano, desde veículos e indústrias até a construção civil e a ressuspensão de poeira.

A relação entre poluição atmosférica e saúde humana tem sido objeto de extensos estudos epidemiológicos em escala global. Pesquisas como as conduzidas por Braga *et al.* (2001, apud OLIVEIRA, 2011) na cidade de São Paulo demonstraram, de forma inequívoca, a associação entre níveis elevados de poluentes atmosféricos e efeitos deletérios à saúde humana. Contudo, persistem lacunas significativas no entendimento dos mecanismos específicos pelos quais esses poluentes afetam o organismo humano, bem como na compreensão dos efeitos sinérgicos resultantes da interação entre múltiplos poluentes (OLIVEIRA, 2011).

Crianças e idosos representam os grupos mais vulneráveis aos impactos da poluição atmosférica. Estudos têm consistentemente demonstrado uma correlação entre o aumento dos níveis de material particulado e o incremento nas internações hospitalares por doenças respiratórias e cardiovasculares, especialmente entre adultos jovens e idosos com histórico de doenças crônicas degenerativas (OLIVEIRA, 2011). Essa vulnerabilidade diferencial sublinha a importância de políticas públicas e intervenções urbanas que priorizem a proteção desses grupos de risco.

A implementação de soluções inteligentes para monitoramento e mitigação da poluição atmosférica surge como uma necessidade premente. Tecnologias como redes de sensores IoT (*Internet of Things*) para monitoramento em tempo real da qualidade do ar, sistemas inteligentes de gerenciamento de tráfego para reduzir congestionamentos e emissões veiculares, e a integração de dados de saúde pública com informações ambientais podem desempenhar um papel importante na abordagem desses desafios (ZANELLA *et al.*, 2014).

Em suma, o caso de São Caetano do Sul ilustra a complexidade do desenvolvimento urbano sustentável no século XXI. Enquanto indicadores tradicionais como o IDH capturam aspectos importantes do progresso social e econômico, a qualidade ambiental e seus impactos na saúde pública emergem como dimensões críticas que não podem ser negligenciadas. O desafio que se apresenta é o de integrar o desenvolvimento econômico com a sustentabilidade ambiental e a promoção da saúde, utilizando tecnologias inteligentes e abordagens inovadoras de planejamento urbano para criar cidades verdadeiramente habitáveis e resilientes.

1.2 PROBLEMA E QUESTÃO DE PESQUISA

Apesar de São Caetano do Sul apresentar o mais alto IDH do Brasil, a cidade enfrenta desafios ambientais significativos devido à sua expressiva frota veicular e atividade industrial, resultando em emissões de poluentes atmosféricos. A exposição a esses poluentes, como material particulado (MP_{10} , $MP_{2,5}$), dióxido de enxofre (SO_2) e dióxido de nitrogênio (NO_2), tem sido associada a um aumento nas doenças respiratórias crônicas, como asma, Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC) e Doenças Respiratórias Crônicas (DRC), impactando a saúde da população.

Tendo em vista a problemática exposta, este trabalho visa responder à seguinte pergunta de pesquisa: “Como a poluição atmosférica em São Caetano do Sul (SP) se relacionou com a prevalência de doenças respiratórias crônicas em seus residentes no período de 2010 a 2023?”.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar como a poluição do ar (MP_{10} , O_3 , NO_2) se relacionou à prevalência de doenças respiratórias crônicas ao longo dos anos de 2010 a 2023 em São Caetano do Sul (SP).

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Analisar as internações por doenças respiratórias crônicas nos residentes de São Caetano do Sul, no período de 2010 a 2023, segundo sexo, faixa etária, tipo de doença e mês/ano de ocorrência.
- ✓ Examinar a relação entre os indicadores supracitados e a concentração dos poluentes atmosféricos (MP_{10} , NO_2 e O_3) em São Caetano do Sul, no período de 2010 a 2023.
- ✓ Investigar tendências, sazonalidades e variações dos indicadores de poluição e internações por doenças respiratórias crônicas no município de São Caetano do Sul, no período de 2010 a 2023.
- ✓ Realização de predições temporais entre as doenças e os poluentes.

1.4 JUSTIFICATIVA

Este estudo sobre a relação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias crônicas em residentes de SCS apresenta relevância significativa por várias razões, que serão apresentadas a seguir.

São Caetano do Sul representa um caso único no Brasil, sendo o município com o maior IDH do país, mas simultaneamente enfrentando desafios ambientais significativos devido à sua expressiva frota veicular e atividade industrial. Este paradoxo de desenvolvimento urbano oferece uma oportunidade ímpar para explorar como o desenvolvimento econômico e social pode coexistir com desafios ambientais e de saúde pública, fornecendo informações significativas para outras cidades em desenvolvimento.

O período de estudo, de 2010 a 2023, permite uma análise de tendências ao longo do tempo, possibilitando a identificação de padrões sazonais, impactos de políticas implementadas durante esse período e a evolução da relação entre poluição e a saúde da população de SCS. Esses resultados podem auxiliar na alocação eficiente de recursos e no planejamento de intervenções preventivas pelos órgãos responsáveis.

A pesquisa se alinha também aos objetivos globais de desenvolvimento urbano sustentável, oferecendo um caso de estudo relevante para a implementação de tecnologias e políticas de cidades inteligentes voltadas para a melhoria da qualidade do ar e saúde pública. Integrando conhecimentos de diversas áreas, incluindo saúde pública, engenharia ambiental e planejamento urbano, o estudo promove uma abordagem holística para problemas urbanos complexos.

Embora focado em SCS, a metodologia e os resultados gerados por este estudo podem ser aplicáveis a outras cidades brasileiras e internacionais com desafios similares, aumentando seu impacto potencial. Além disso, a pesquisa se alinha diretamente com vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), particularmente o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) e o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), contribuindo para o cumprimento de metas globais de desenvolvimento.

Apesar da extensa literatura sobre poluição do ar e saúde, poucos estudos focaram em cidades de alto IDH em países em desenvolvimento. Dessa forma, este trabalho preenche uma lacuna importante na compreensão das complexidades do desenvolvimento urbano sustentável em contextos emergentes.

No contexto das cidades inteligentes e sustentáveis, a experiência de São Caetano do Sul oferece ideias valiosas. Por um lado, demonstra que é possível alcançar altos níveis de

desenvolvimento humano em um contexto urbano. Por outro, evidencia que mesmo cidades com bom desempenho em indicadores convencionais enfrentam desafios significativos em termos de sustentabilidade ambiental e saúde pública.

Em suma, esta pesquisa não apenas contribui para o avanço do conhecimento científico na interface entre saúde pública, meio ambiente e desenvolvimento urbano, mas também pode oferecer caminhos práticos e aplicáveis para influenciar positivamente a qualidade de vida em SCS. Sua relevância se estende do nível local ao global, abordando questões críticas de sustentabilidade urbana e saúde pública no contexto das cidades do século XXI.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir, é trazido um referencial teórico que aborda diversos tópicos, incluindo Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica como desafio global em contextos urbanos; a relação entre poluentes, clima e doenças respiratórias; o impacto da industrialização e urbanização nos poluentes atmosféricos; um enfoque integrado entre cidades inteligentes e sustentáveis, poluição e saúde pública; e, por fim, alguns estudos internacionais e nacionais sobre o tema.

2.1 DOENÇA PULMONAR OBSTRUTIVA CRÔNICA (DPOC): UM DESAFIO GLOBAL EM CONTEXTOS URBANOS

Segundo o Ministério da Saúde (BRASIL, 2010), as doenças respiratórias crônicas (DRC) englobam doenças crônicas tanto das vias aéreas superiores como das inferiores. Como doenças mais comumente encontradas, temos a asma, a rinite alérgica e a Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica. Essas doenças, em conjunto, acabam por representar um dos maiores problemas de saúde mundialmente.

A DPOC emerge como um dos mais significativos desafios de saúde pública do século XXI, com implicações profundas para indivíduos, sistemas de saúde e economias globais. Caracterizada por uma obstrução persistente do fluxo aéreo, geralmente progressiva e associada a uma resposta inflamatória crônica das vias aéreas e pulmões, a DPOC afeta aproximadamente 10% da população acima dos 40 anos globalmente (ADELOYE *et al.*, 2015). Essa prevalência, no entanto, pode estar subestimada devido ao subdiagnóstico, especialmente em países de baixa e média renda (LAMPRECHT *et al.*, 2015).

2.1.1 Epidemiologia e Impacto Global da DPOC

Em 2019, a DPOC ascendeu à posição de terceira principal causa de mortalidade mundial, resultando em 3,23 milhões de óbitos, um aumento de 7,6% em comparação com o ano de 2000 (WORLD HEALTH ORGANIZATION [WHO], 2020). Projeções indicam que, mantidas as tendências atuais, a DPOC poderá se tornar a principal causa de morte em algumas regiões do mundo até 2030 (MATHERS; LONCAR, 2006). Esse cenário alarmante é exacerbado pelo envelhecimento populacional global e pela persistência de fatores de risco, especialmente em ambientes urbanos.

O impacto econômico da DPOC é igualmente significativo e multifacetado. Nos Estados Unidos da América (EUA), os gastos anuais diretos com tratamento e controle da doença atingem a marca de 32 bilhões de dólares (RITCHIE; WEDZICHA, 2020). Entretanto, quando considerados os custos indiretos, incluindo perda de produtividade e impacto na qualidade de vida, as estimativas globais de custo da DPOC chegam a 2,1 trilhões de dólares anualmente (BLOOM *et al.*, 2011). No contexto brasileiro, um estudo de Dino (2026) estimou que os custos diretos anuais da DPOC para o Sistema Único de Saúde (SUS) ultrapassam R\$ 103 milhões, destacando o fardo econômico substancial para os sistemas públicos de saúde.

2.1.2 Fisiopatologia e Manifestações Clínicas da DPOC

A complexidade da DPOC se manifesta em sua fisiopatologia heterogênea, que engloba componentes enfisematosos e de bronquite crônica em diversos graus. Essa heterogeneidade não é apenas clínica, mas também molecular e genética, como demonstrado por estudos recentes de fenótipos e endótipos da DPOC (AGUSTI *et al.*, 2018). O processo fisiopatológico tem início com a exposição crônica a partículas nocivas, desencadeando uma cascata inflamatória que leva à remodelação das vias aéreas e destruição do parênquima pulmonar. Recentes avanços na compreensão da fisiopatologia da DPOC têm destacado o papel do estresse oxidativo, desequilíbrio protease-antiprotease e alterações na microbiota pulmonar (BARNES, 2016). Além disso, a descoberta de que a DPOC pode ter origens no desenvolvimento pulmonar fetal e na infância precoce tem ampliado a janela temporal para intervenções preventivas (POSTMA; BUSH; VAN DEN BERGE, 2015).

O quadro clínico da DPOC é caracterizado inicialmente por sintomas como dispneia, tosse e produção crônica de escarro. À medida que a doença progride, esses sintomas se agravam, frequentemente exacerbados por infecções respiratórias agudas. As exacerbações da

DPOC, definidas como pioras agudas dos sintomas respiratórios que necessitam de terapia adicional, são eventos críticos na história natural da doença, associados a declínio acelerado da função pulmonar, redução da qualidade de vida e aumento da mortalidade (WEDZICHA *et al.*, 2017).

Um aspecto fundamental no manejo da DPOC é a alta prevalência de comorbidades. Estudos indicam que mais de 80% dos pacientes com DPOC apresentam pelo menos uma comorbidade significativa. As mais comuns incluem doenças cardiovasculares (30-50% dos pacientes); diabetes mellitus (12-37% dos pacientes); osteoporose (20-30%); depressão e ansiedade (20-40%) e câncer de pulmão (3-7%) (SMITH; WROBEL, 2014).

Essas comorbidades não apenas complicam o tratamento, mas também impactam significativamente o prognóstico e a qualidade de vida dos pacientes, aumentando a complexidade do manejo clínico e a carga sobre os sistemas de saúde urbanos.

2.1.3 Fatores de Risco no Ambiente Urbano

Embora o tabagismo permaneça como o principal fator de risco, respondendo por aproximadamente 80-90% dos casos de DPOC em países desenvolvidos (RABE; WATZ, 2017), o ambiente urbano moderno apresenta uma constelação de fatores contribuintes adicionais:

- ✓ Poluição Atmosférica: Estudos epidemiológicos recentes têm fortalecido a evidência da relação causal entre exposição crônica a poluentes atmosféricos e desenvolvimento de DPOC. Um estudo de coorte conduzido em várias cidades europeias demonstrou que um aumento de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ na exposição a longo prazo ao $\text{MP}_{2.5}$ estava associado a um aumento de 52% no risco de DPOC (LIU *et al.*, 2021). Em contextos urbanos de rápido crescimento, como na China e Índia, a poluição do ar se estabelece como um fator de risco cada vez mais significativo (SALVI; BARNES, 2009).
- ✓ Exposição Ocupacional: Estimativas globais sugerem que a exposição ocupacional a poeiras, fumos e gases tóxicos é responsável por 15-20% dos casos de DPOC (BLANC *et al.*, 2019). Em ambientes urbanos com alta concentração industrial, este fator ganha ainda mais relevância.
- ✓ Fatores Socioeconômicos: A urbanização rápida e não planejada frequentemente resulta em disparidades socioeconômicas que impactam diretamente a saúde respiratória. Um estudo multicêntrico em seis países de baixa e média renda

encontrou uma forte associação entre baixo nível socioeconômico e maior prevalência de DPOC (GRIGSBY *et al.*, 2016).

- ✓ Infecções Respiratórias na Infância: Evidências crescentes sugerem que infecções respiratórias graves na infância, mais comuns em ambientes urbanos densamente povoados, podem predispor ao desenvolvimento de DPOC na idade adulta (MARTINEZ, 2016).

2.1.4 DPOC e Cidades Inteligentes: Perspectivas Inovadoras

O paradigma das cidades inteligentes oferece oportunidades inovadoras para enfrentar os desafios impostos pela DPOC em ambientes urbanos:

- ✓ Monitoramento Ambiental em Tempo Real: Redes de sensores IoT podem fornecer dados em tempo real sobre a qualidade do ar, permitindo que indivíduos com DPOC evitem áreas com altos níveis de poluição. Um estudo piloto realizado em Barcelona (Espanha) demonstrou que o uso de aplicativos móveis conectados a redes de sensores urbanos pode reduzir a exposição pessoal a poluentes em até 65% (CASTELL *et al.*, 2017).
- ✓ Telemedicina e Monitoramento Remoto: Tecnologias de saúde digital têm demonstrado potencial para melhorar o manejo da DPOC. Uma metanálise recente de 29 estudos mostrou que intervenções de telemedicina podem reduzir as taxas de hospitalização por exacerbação de DPOC em até 64% (HONG; LEE, 2019).
- ✓ Planejamento Urbano Inteligente: O *design* de espaços verdes urbanos e corredores de ventilação pode ajudar a mitigar os níveis de poluição do ar. Um estudo em Shanghai (China) demonstrou que a implementação de corredores de ventilação urbana pode reduzir a concentração de MP_{2,5} em até 15% em áreas densamente povoadas (YANG *et al.*, 2020).
- ✓ Mobilidade Sustentável: A promoção de sistemas de transporte de baixa emissão e infraestrutura para mobilidade ativa pode reduzir a exposição a poluentes relacionados ao tráfego. Um estudo de modelagem em Barcelona (Espanha) estimou que a implementação de superquadras (áreas com tráfego reduzido) poderia prevenir 667 casos de DPOC anualmente na cidade (MUELLER *et al.*, 2020).

2.1.5 Conclusão do Capítulo

A DPOC representa um desafio multifacetado para a saúde pública urbana, exigindo uma abordagem integrada que considere fatores ambientais, socioeconômicos e comportamentais. O paradigma das cidades inteligentes e sustentáveis oferece uma estrutura promissora para abordar esses desafios, combinando tecnologias avançadas com planejamento urbano centrado no ser humano.

À medida que as cidades continuam a crescer e evoluir, a integração de estratégias de prevenção e manejo da DPOC no planejamento urbano torna-se cada vez mais necessária. Isso não apenas para mitigar o impacto da doença na qualidade de vida dos indivíduos e nos sistemas de saúde, mas também para promover ambientes urbanos mais saudáveis e resilientes para as gerações futuras. A sinergia entre avanços na compreensão da fisiopatologia da DPOC, inovações tecnológicas em saúde digital e abordagens de planejamento urbano sustentável oferece um caminho para enfrentar esse desafio global de saúde pública no contexto das cidades do século XXI.

2.2 RELAÇÃO ENTRE POLUENTES, CLIMA E DOENÇAS RESPIRATÓRIAS

A interação entre o clima e os poluentes atmosféricos é um aspecto fundamental na compreensão dos efeitos da poluição do ar na saúde humana, especialmente em ambientes urbanos. Os fatores climáticos desempenham um papel significativo na dispersão, concentração e até mesmo na formação de poluentes atmosféricos, influenciando diretamente sua presença e impacto nas áreas habitadas (BRASIL, 2021).

A avaliação do impacto global da poluição do ar na saúde deve considerar os fatores climáticos que atuam na dispersão de poluentes. Nardocci *et al.* (2013) destacam a importância dessa avaliação para fortalecer a vigilância em saúde ambiental pelo setor público. As condições meteorológicas, como temperatura, umidade, velocidade e direção dos ventos, podem afetar significativamente a concentração e distribuição de poluentes atmosféricos.

Por exemplo, em períodos de inversão térmica, comuns em algumas regiões durante o inverno, os poluentes ficam retidos próximos à superfície, aumentando sua concentração e, conseqüentemente, os riscos à saúde da população. Por outro lado, ventos fortes podem dispersar os poluentes, reduzindo sua concentração local, mas potencialmente afetando áreas

mais distantes (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO [CETESB], 2023).

O material particulado (MP), um dos principais poluentes atmosféricos, é particularmente sensível às condições climáticas. Conforme definido por Silva *et al.* (2010), o material particulado fino pode permanecer suspenso no ar e percorrer longas distâncias, sendo sua dispersão fortemente influenciada por padrões climáticos e meteorológicos.

Além disso, as mudanças climáticas globais podem exacerbar os problemas relacionados à poluição do ar. O aumento das temperaturas médias pode levar a uma maior formação de ozônio troposférico, um poluente secundário formado pela reação de outros poluentes na presença de luz solar.

O ozônio troposférico não tem sua emissão realizada de forma direta para o ar, sendo criado através de reações químicas entre óxidos de nitrogênio (NOX) e compostos orgânicos voláteis (COV). Tal processo decorre da reação fotoquímica entre a luz solar e os efluentes atmosféricos originados do tráfego veicular, usinas termelétricas e do setor industrial e químico. Conquanto a formação do ozônio atinja picos críticos prioritariamente em períodos quentes e ensolarados no meio urbano, níveis elevados podem persistir nos meses frios, agravando substancialmente o quadro de pessoas asmáticas. (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [EPA], 2025).

Essa interação entre clima e poluentes também pode acabar influenciando a eficácia das estratégias de controle da poluição. Como exemplo, medidas que são eficazes em determinadas condições climáticas podem ser menos eficientes em outras, exigindo uma abordagem adaptativa na gestão da qualidade do ar urbano (Nardocci *et al.*, 2013).

Considerando a meta 11.6 do ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis – que visa reduzir o impacto ambiental negativo das cidades, com atenção especial à qualidade do ar, é fundamental que as políticas de gestão ambiental e urbana levem em conta as interações complexas entre clima e poluentes. Isso inclui o desenvolvimento de sistemas de monitoramento avançados que possam prever e responder a mudanças nas condições climáticas que afetam a dispersão de poluentes (GRUPO EXECUTIVO SOBRE MUDANÇA DO CLIMA [GEx-CIM], 2015).

2.3 O IMPACTO DA INDUSTRIALIZAÇÃO E URBANIZAÇÃO NOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A industrialização e a urbanização, processos intrinsecamente ligados ao desenvolvimento econômico global, têm exercido uma influência significativa na qualidade do ar e na concentração de poluentes atmosféricos. Esses fenômenos, embora fundamentais para o progresso socioeconômico, trouxeram consigo desafios substanciais para a saúde pública e o equilíbrio ecológico (SEINFELD; PANDIS, 2016).

O crescimento industrial tem sido um dos principais contribuintes para a emissão de poluentes atmosféricos. As indústrias, especialmente aquelas ligadas aos setores de energia, manufatura e química, são fontes significativas de emissões de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e material particulado (MP) (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY [EEA], 2019). Essas emissões não apenas contribuem para o aquecimento global, mas também ocasionam impactos diretos na saúde humana, particularmente em doenças respiratórias e cardiovasculares (WHO, 2018).

Paralelamente, a urbanização acelerada tem intensificado a concentração de poluentes em áreas densamente povoadas. O aumento do tráfego veicular, uma consequência direta da expansão urbana, é uma fonte significativa de poluentes como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos e partículas finas (KARAGULIAN *et al.*, 2015). Além disso, a construção civil e a redução de áreas verdes em ambientes urbanos contribuem para o aumento de poeira e partículas suspensas no ar (FUZZI *et al.*, 2015).

A interação entre poluentes industriais e urbanos pode criar condições ainda mais nocivas. Por exemplo, a formação de *smog* fotoquímico, resultado da reação entre óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis na presença de luz solar, é um fenômeno comum em grandes centros urbanos industrializados (MONKS *et al.*, 2015). Esse *smog* não apenas reduz a visibilidade, mas também agrava problemas respiratórios, especialmente em grupos vulneráveis como crianças e idosos (GUARNIERI; BALMES, 2014).

A exposição a esses poluentes pode ocorrer de forma isolada ou combinada, o que pode potencializar os efeitos nocivos à saúde. Além disso, a suscetibilidade individual à poluição do ar pode variar em função de fatores como idade, estado de saúde, hábitos de vida e condições socioeconômicas (WHO, 2020). Estudos têm demonstrado que crianças, idosos, gestantes e pessoas com doenças respiratórias ou cardiovasculares preexistentes são mais vulneráveis aos efeitos da poluição do ar (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION [APHA], 2023).

O impacto desses poluentes vai além da saúde humana. A deposição ácida, resultante da emissão de SO₂ e NO_x, afeta ecossistemas aquáticos e terrestres, causando a acidificação de lagos e solos, e danificando florestas (DRISCOLL *et al.*, 2001). Além disso, a poluição do ar contribui para a degradação de monumentos históricos e infraestruturas urbanas, acelerando processos de corrosão e deterioração (WATT *et al.*, 2009).

A gestão desses impactos requer uma abordagem multifacetada. Políticas de controle de emissões industriais, incentivos para tecnologias limpas e eficientes e planejamento urbano sustentável são fundamentais (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME [UNEP], 2019). A implementação de sistemas de transporte público de baixa emissão, o aumento de áreas verdes urbanas e a promoção de construções sustentáveis são estratégias importantes para mitigar os efeitos da urbanização na qualidade do ar (C40 CITIES, 2020).

Iniciativas globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, particularmente o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), fornecem um quadro para ações coordenadas (UNITED NATIONS [UN], 2015). Essas metas incentivam o desenvolvimento de cidades mais limpas e resilientes, bem como a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Em conclusão, enquanto a industrialização e a urbanização continuam a moldar o mundo moderno, é imperativo que seu progresso seja equilibrado com práticas sustentáveis e tecnologias limpas. O monitoramento contínuo da qualidade do ar, a implementação de regulamentações rigorosas e o investimento em pesquisa e desenvolvimento de soluções inovadoras são essenciais para mitigar os impactos negativos desses processos nos poluentes atmosféricos (EEA, 2020).

2.3.1 O Impacto da Industrialização e Urbanização nos Poluentes Atmosféricos Específicos

Segundo a Resolução nº 491/2018 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), o material particulado fino é definido como o conjunto de partículas de material sólido ou líquido suspenso no ar, na forma de poeira, aerossol, fumaça, entre outras, que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias (BRASIL, 2018).

O material particulado pode ser dividido, basicamente, em dois *ranges* distintos de partículas, definidos por intervalos de tamanho e fontes de emissão com maior concentração de partículas: o *range* das partículas finas, menores que 2,5 µm de diâmetro aerodinâmico,

provenientes da condensação de gases; e o *range* de partículas grossas, maiores que 2,5 µm, como, por exemplo, fuligem ou poeira (SEINFELD; PANDIS, 2016).

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados durante processos de combustão, onde geralmente os veículos são os principais responsáveis por sua emissão. O NO, ao entrar em contato com a luz solar e O₂ (ou O₃) se transforma em NO₂. A depender de sua concentração, o NO₂ causa prejuízos à saúde (CETESB, 2020). Concentrações elevadas tem o potencial de aumentar as internações hospitalares oriundas de problemas respiratórios e pulmonares, além de agravamento à resposta imunológica de indivíduos sensíveis a alérgenos (BRASIL, 2024).

O dióxido de enxofre (SO₂) deriva de processos tanto naturais quanto antrópicos. No âmbito das emissões humanas, destacam-se os setores industriais que utilizam matérias-primas ricas em enxofre — como a siderurgia, a fundição de alumínio, a fabricação de papéis, fertilizantes e a geração termelétrica. O composto também integra os gases de exaustão veicular, associado especialmente à queima de combustíveis fósseis em motores a diesel e geradores. Contudo, suas concentrações atmosféricas apresentam uma tendência de queda, impulsionada por regulamentações mais severas sobre efluentes e pela diminuição do teor de enxofre no diesel e na gasolina.

A presença de SO₂ na atmosfera contribui para a precipitação ácida e atua como precursor dos sulfatos, que figuram entre os componentes fundamentais do material particulado em suspensão (MP₁₀). Para a população em geral, a inalação constitui a forma predominante de contato com esse poluente. A exposição a elevadas concentrações de SO₂ está associada a desconforto respiratório e ao comprometimento e exacerbação de patologias cardiorrespiratórias. (CETESB, 2020).

2.3.2 O Crescimento da Frota Veicular e a Industrialização Brasileira

Nas últimas duas décadas, o Brasil testemunhou um expressivo aumento tanto em sua frota veicular quanto em seu processo de industrialização. Esses fenômenos, impulsionados por políticas de incentivo ao consumo e crescimento econômico, trouxeram consigo uma série de impactos, tanto positivos quanto negativos, para a sociedade brasileira.

O aumento da frota veicular no Brasil, especialmente a partir dos anos 2000, pode ser atribuído a diversos fatores. A estabilização econômica, o aumento da renda disponível da população e a facilidade de acesso ao crédito impulsionaram a demanda por veículos automotores (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES [ANFAVEA], 2023). Além disso, políticas governamentais de incentivo à

indústria automobilística, como a redução de impostos e a criação de programas de financiamento, contribuíram para o barateamento dos veículos e o aumento das vendas (DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO [DENATRAN], 2022).

De acordo com dados do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2022), a frota de veículos no Brasil saltou de aproximadamente 30 milhões em 2003 para mais de 115 milhões em 2022, um crescimento de quase 300% em duas décadas. Esse aumento foi particularmente significativo nas grandes cidades, onde a dependência do automóvel como principal meio de transporte gerou congestionamentos, poluição do ar e problemas de mobilidade urbana (IBGE, 2020).

Paralelamente ao aumento da frota veicular, o Brasil também experimentou um processo de industrialização significativo nos últimos 20 anos. O setor industrial, impulsionado pelo crescimento do mercado interno e pelas exportações de *commodities*, expandiu sua capacidade produtiva e diversificou sua oferta de produtos (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA [CNI], 2023). A indústria automobilística, em particular, foi um dos setores que mais se beneficiaram desse crescimento, com a instalação de novas fábricas e o aumento da produção de veículos (ANFAVEA, 2023).

No entanto, o processo de industrialização brasileira também trouxe uma série de desafios. A concentração da atividade industrial em determinadas regiões do país gerou desigualdades regionais e problemas de infraestrutura (IBGE, 2020). Além disso, a dependência de fontes de energia não renováveis e a falta de investimentos em tecnologias limpas contribuíram para o aumento da emissão de GEE e a degradação ambiental (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA [MME], 2021).

O aumento da frota veicular e a industrialização brasileira nos últimos 20 anos tiveram impactos significativos na economia, na sociedade e no meio ambiente. Na economia, o crescimento desses setores gerou empregos, renda e arrecadação de impostos. Na sociedade, o acesso ao automóvel proporcionou maior mobilidade e conforto para a população, enquanto a industrialização contribuiu para a modernização e o desenvolvimento do país (CNI, 2023).

No entanto, os impactos negativos também foram consideráveis. O aumento da frota veicular gerou congestionamentos, poluição do ar, acidentes de trânsito e problemas de saúde pública (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS [CNM], 2023). A industrialização, por sua vez, contribuiu para a degradação ambiental, a emissão de gases de efeito estufa, a exploração de recursos naturais e a geração de resíduos (MME, 2021).

2.3.3 Política de Controle de Poluentes em São Caetano do Sul: Avanços e Desafios

São Caetano do Sul, por ser um município com forte vocação industrial e comercial, além de possuir uma densa malha viária, apresenta fontes de emissão de poluentes diversificadas. As principais incluem emissões veiculares, atividades industriais e, em menor escala, emissões residenciais (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CAETANO DO SUL [PMSCS], 2021). Reconhecendo a importância de monitorar e controlar a qualidade do ar, o município tem implementado medidas para reduzir a emissão de poluentes e proteger a saúde da população.

Uma das principais ações de controle de poluentes em SCS é o monitoramento da qualidade do ar. A cidade conta com estações de monitoramento que medem a concentração de diversos poluentes, como material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}), ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂) (CETESB, 2023). Os dados coletados são utilizados para avaliar a qualidade do ar e orientar as ações de controle de poluentes.

Apesar dos avanços, a política de controle de poluentes em São Caetano do Sul ainda enfrenta desafios significativos. A localização do município na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) o torna vulnerável à poluição atmosférica proveniente de outras cidades, o que dificulta o controle da qualidade do ar (CETESB, 2023). Além disso, a falta de recursos financeiros e humanos pode limitar a capacidade do município de implementar e fiscalizar as ações de controle de poluentes.

2.4 CIDADES INTELIGENTES E SUSTENTÁVEIS: UM ENFOQUE INTEGRADO EM POLUIÇÃO, SAÚDE PÚBLICA, ODS E NORMAS ISO

Em resposta aos desafios urbanos contemporâneos, o conceito de Cidades Inteligentes e Sustentáveis (CIS) emerge como uma abordagem inovadora que busca equilibrar desenvolvimento econômico, qualidade de vida e proteção ambiental (FIA BUSINESS SCHOOL, 2023). Nesse contexto, onde a poluição do ar se configura como um dos maiores riscos à saúde pública, a perspectiva das CIS torna-se ainda mais relevante.

Cidades inteligentes são definidas como aquelas que utilizam Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) para aprimorar a qualidade de vida, a eficiência das operações urbanas e a competitividade econômica, garantindo, ao mesmo tempo, o atendimento às necessidades das gerações presentes e futuras, conforme define a União Internacional de

Telecomunicações (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION [ITU], 2021). Paralelamente, a sustentabilidade urbana engloba a gestão eficiente dos recursos naturais, a redução das emissões de poluentes, a promoção da saúde pública e a garantia do acesso a serviços básicos para todos os cidadãos, como aponta o Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos (UN-HABITAT, 2016).

A poluição do ar, proveniente de fontes como emissões veiculares, atividades industriais e queima de biomassa, representa um grave problema de saúde pública nas cidades. A exposição a poluentes atmosféricos, como material particulado, ozônio (O₃) e dióxido de nitrogênio (NO₂), está associada a uma série de efeitos adversos à saúde, incluindo doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer de pulmão, conforme alerta a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2020).

Diante desse cenário, os ODS, estabelecidos na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), oferecem um roteiro para o desenvolvimento sustentável em escala global. Diversos ODS estão diretamente relacionados à temática de cidades inteligentes e sustentáveis, poluição e saúde pública. Entre eles, destaca-se o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), que visa, entre outras metas, reduzir a mortalidade por doenças não transmissíveis relacionadas à poluição do ar; o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), que busca tornar as cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis, com foco na melhoria da qualidade do ar e na gestão de resíduos; e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), que busca adotar medidas para combater a mudança do clima e seus impactos, incluindo a redução das emissões de gases de efeito estufa (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS [ONU], 2025).

As normas ISO (*International Organization for Standardization*) também desempenham um papel essencial, fornecendo diretrizes e requisitos para sistemas de gestão da qualidade, ambiental e de sustentabilidade. Algumas normas ISO relevantes para o tema de cidades inteligentes e sustentáveis incluem a ISO 37120 (Indicadores de Cidades Sustentáveis), que define um conjunto de indicadores para medir o desempenho das cidades em diversas dimensões, incluindo qualidade do ar, gestão de resíduos e saúde pública; a ISO 14001 (Sistema de Gestão Ambiental), que estabelece os requisitos para um sistema de gestão ambiental eficaz, que pode ser utilizado para controlar e reduzir os impactos ambientais das atividades urbanas; e a ISO 50001 (Sistema de Gestão de Energia), que define os requisitos para um sistema de gestão de energia, que pode ser utilizado para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION [ISO], 2025).

Em conclusão, as cidades inteligentes e sustentáveis representam uma abordagem promissora para enfrentar os desafios da poluição e promover a saúde pública. Ao integrar tecnologias, políticas públicas e participação social, as cidades podem criar ambientes urbanos mais saudáveis, resilientes e sustentáveis. Os ODS e as normas ISO oferecem um roteiro para a construção de cidades mais inteligentes e sustentáveis, orientando as ações e medindo o progresso em direção a um futuro mais próspero e equitativo.

2.5 ESTUDOS SOBRE A RELAÇÃO ENTRE EXPOSIÇÃO A POLUENTES E DESFECHOS EM SAÚDE

Nesta seção, são trazidos alguns estudos internacionais e nacionais que investigaram associações entre exposição a poluentes e desfechos adversos à saúde. Utilizando abordagens estatísticas robustas, como modelos de regressão, análise de sobrevivência e modelos de riscos proporcionais, essas pesquisas exploram os impactos de poluentes atmosféricos, como partículas finas ($MP_{2,5}$), dióxido de nitrogênio e carbono negro, em condições como doenças respiratórias, cardiovasculares e mortalidade. Essas pesquisas destacam a importância de compreender os mecanismos e a magnitude dos efeitos da poluição do ar na saúde, com vistas a orientar políticas públicas e intervenções em saúde ambiental.

No âmbito internacional, Harkema *et al.* (2004) realizaram um estudo experimental baseado em modelo animal para investigar os efeitos adversos da poluição por partículas finas ($MP_{2,5}$) nas vias aéreas, em um contexto de alta prevalência de asma infantil em uma comunidade de Detroit, EUA. Os objetivos foram caracterizar as propriedades químicas e físicas do $MP_{2,5}$ presente no ar, avaliar os impactos dessas partículas nas vias aéreas de ratos saudáveis e outros com condições hipersecretórias preexistentes (simulando asma) e identificar os componentes específicos do $MP_{2,5}$ responsáveis por causar inflamação e alterações epiteliais. A pesquisa observou que a composição química do $MP_{2,5}$, mais do que a sua quantidade total, determina a gravidade dos efeitos respiratórios. Componentes específicos, como aqueles derivados de combustão, foram os principais desencadeadores das alterações observadas. Esses achados sugerem que indivíduos com asma, especialmente em áreas urbanas com alta poluição, estão mais vulneráveis aos impactos das partículas finas, reforçando a necessidade de políticas de controle da qualidade do ar focadas na redução de poluentes específicos.

Outro estudo, conduzido por Kelly *et al.* (2011), investigou os impactos da Zona de Baixa Emissão de Londres, uma iniciativa para melhorar a qualidade do ar ao restringir a entrada de veículos poluentes na cidade. A pesquisa buscou prever mudanças na qualidade do

ar, estabelecer uma rede de monitoramento de poluentes, avaliar o potencial de danos oxidativos de partículas finas e desenvolver métodos para estudar os efeitos dessa Zona na saúde, com foco em doenças respiratórias e cardiovasculares. Uma rede de 28 pontos de monitoramento foi criada para medir poluentes e tráfego em Londres, e modelos computacionais previram concentrações de poluentes como óxidos de nitrogênio e MP_{2,5}. Amostras de MP_{2,5} de áreas movimentadas mostraram capacidade aumentada para causar danos oxidativos, devido a metais como ferro e cobre, com maior impacto dentro de Londres. Registros médicos de 42 clínicas foram usados para correlacionar níveis de poluição e saúde, mas não houve associações claras com doenças respiratórias ou cardiovasculares nos dados analisados, exceto uma relação inesperada de menos diagnósticos de asma em áreas poluídas. As previsões indicaram pequenas reduções de poluentes perto de grandes vias, e a rede de monitoramento foi eficaz. O estudo concluiu que registros médicos são viáveis para pesquisas futuras, mas os benefícios diretos da intervenção na saúde podem ser difíceis de comprovar devido aos pequenos efeitos observados.

Já um estudo de caso-controle sobre asma infantil realizado na Dinamarca por Holst *et al.* (2020) buscou identificar fatores de risco, incluindo poluição do ar e aspectos familiares, para o início da asma e chiado persistente em crianças de 1 a 15 anos de idade, nascidas entre 1997 e 2014. Utilizando registros nacionais de saúde, os autores analisaram 122.842 casos, comparados a um grupo controle, focando na influência da poluição do ar (partículas finas e dióxido de nitrogênio) e fatores familiares, como histórico de asma parental, tabagismo materno na gravidez, educação e renda dos pais. Modelos computacionais estimaram a exposição a poluentes em áreas residenciais, enquanto os dados familiares foram obtidos de registros oficiais. Crianças com pais asmáticos apresentaram até 2,4 vezes mais risco de desenvolver asma; tabagismo materno na gravidez aumentou o risco em 20%; e maior educação e renda dos pais reduziram a probabilidade da doença. A exposição a partículas finas (< 2,5 µm) elevou o risco de asma e chiado persistente em 5% para cada 5 µg/m³, com associação menos robusta para dióxido de nitrogênio. O estudo sugere que reduzir a poluição por partículas finas pode diminuir a incidência de asma infantil.

Outro estudo, realizado no âmbito do projeto ELAPSE (*Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe*) investigou os efeitos da exposição prolongada a baixos níveis de poluentes atmosféricos, como partículas finas (MP_{2,5}), carbono negro (CN), dióxido de nitrogênio (NO₂) e ozônio, em populações europeias. A pesquisa buscou entender a relação entre essas exposições e diversos desfechos de saúde, como mortes por causas naturais, doenças cardiovasculares, respiratórias e câncer de pulmão. Foram analisados dados de 11 países europeus, utilizando uma coorte agrupada com cerca de 325 mil participantes de 15 estudos

preexistentes e sete coortes administrativas com cerca de 28 milhões de indivíduos. Modelos avançados estimaram concentrações de poluentes com alta resolução espacial, integrando dados de monitoramento, uso do solo e satélites. As associações entre poluentes e desfechos de saúde foram avaliadas com modelos estatísticos ajustados por variáveis como idade, sexo, renda e tabagismo. A exposição a partículas finas, carbono negro e dióxido de nitrogênio foi significativamente associada a um maior risco de morte por causas naturais, cardiovasculares, respiratórias e câncer de pulmão em ambas as coortes. Mesmo em níveis abaixo dos limites europeus, como $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para partículas finas, os riscos permaneceram elevados. A relação entre exposição e mortalidade mostrou curvas mais acentuadas em baixas concentrações, sem indícios de um limite seguro. Inversamente, o ozônio apresentou associações negativas com os desfechos, possivelmente devido a correlações com outros poluentes. O estudo também encontrou relação entre partículas finas e dióxido de nitrogênio com maior incidência de asma, DPOC e eventos cardiovasculares (BRUNEKREEF *et al.*, 2021).

Da mesma forma, o estudo MAPLE (*Mortality-Air Pollution Associations in Low Exposure Environments*) investigou a relação entre a exposição prolongada a baixos níveis de partículas finas ($\text{MP}_{2,5}$) e a mortalidade em 7,1 milhões de adultos canadenses, acompanhados de 1991 a 2016, com foco em concentrações abaixo dos padrões atuais de qualidade do ar. A pesquisa avaliou os impactos dessa exposição na mortalidade geral e por causas específicas (doenças cardiovasculares, respiratórias e diabetes), e explorou variações regionais e a influência de outros poluentes, como o ozônio. Os modelos estatísticos foram ajustados por idade, sexo, renda e comportamento. Foi observado que a exposição a partículas finas, mesmo em níveis baixos (a partir de $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), foi associada a um maior risco de morte por todas as causas analisadas, com efeitos mais intensos em baixas concentrações. Não houve um nível seguro de exposição, com o risco aumentando rapidamente em concentrações menores e estabilizando em níveis mais altos. Ajustes por ozônio reduziram a força da associação, e variações regionais sugeriram que a composição química das partículas influencia os efeitos, indicando diferenças conforme a localização e a mistura de poluentes (BRAUER *et al.*, 2022).

McDuffie *et al.* (2021), por sua vez, avaliaram globalmente as fontes de poluição do ar, como queima de combustíveis fósseis, poeira transportada pelo vento e atividades agrícolas, e sua contribuição para concentrações de partículas finas ($\text{MP}_{2,5}$) no ar e mortes prematuras. Os autores analisaram 204 países e 200 áreas subnacionais, focando em setores como energia, indústria e transporte, e combustíveis como carvão, petróleo, gás e biocombustíveis. O estudo revelou que a queima de combustíveis fósseis causou cerca de um milhão de mortes em 2017 (27,3% do total ligado ao $\text{MP}_{2,5}$), sendo o carvão o maior contribuinte. Setores de geração de

energia, indústria e residencial (aquecimento e cozinha) foram os principais emissores, enquanto a agricultura e a poeira tiveram impacto relevante em regiões como a África Subsaariana, onde a poeira causou 70,6% das mortes na Nigéria. Na Ásia predominaram a queima de carvão e os biocombustíveis. As contribuições variaram por país, destacando a necessidade de políticas específicas para reduzir emissões de fontes dominantes e a carga global de doenças associada à poluição.

Por fim, Lei *et al.* (2023) investigaram as associações entre exposição de curto prazo a partículas finas ($MP_{2,5}$) e grossas ($MP_{2,5-10}$) e internações hospitalares por uma ampla gama de doenças respiratórias na China, com foco em diferenças por idade. O estudo analisou 1.399.955 registros de internações de 153 hospitais em 20 regiões provinciais entre 2013 e 2020. Os dados de exposição à poluição do ar foram obtidos de estações de monitoramento da qualidade do ar próximas aos hospitais. Modelos de regressão logística condicional e modelos de *lag* distribuído estimaram associações de exposição e resposta, ajustadas por fatores como temperatura e umidade. Os resultados mostraram que aumentos no intervalo interquartil de $MP_{2,5}$ ($34,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e $MP_{2,5-10}$ ($26,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) elevaram as internações por doenças respiratórias em 1,73% e 1,70%, respectivamente, com efeitos durando até 4 dias. Infecções respiratórias agudas (pneumonia, bronquite) foram consistentemente associadas em todas as idades, mas o espectro de doenças variou: crianças apresentaram maior risco para laringite e influenza; idosos, para doenças crônicas como DPOC e asma. As associações foram mais fortes em mulheres, crianças, idosos, no Sul da China e na estação quente.

Quanto aos estudos nacionais, Vormittag *et al.* (2021) mostraram que apenas dez estados e o Distrito Federal efetuam a vigilância de qualidade de ar por meio de 371 unidades operacionais – 80% dessas localizadas na Região Sudeste. Dados adicionais de importância incluem: (i) 41,2% das estações nacionais possuem caráter particular; no estado do Rio de Janeiro, elas correspondem a 60% do conjunto de suas unidades, ao passo que no estado de São Paulo, 100% das estações pertencem à esfera governamental; (ii) o MP_{10} constitui o contaminante preponderante em 62,8% das estações e o $MP_{2,5}$ em apenas 25,9% delas; e (iii) a divulgação dos registros de acompanhamento em tempo corrente para a população se efetiva em apenas cinco estados. Ademais, decorridas três décadas desde a sua concepção, a Rede Nacional de Qualidade do Ar mostra-se inacabada e com implementação deficiente, o que impede uma gerência apropriada da qualidade do ar por parte das entidades de meio ambiente.

O estudo de Araujo & Araujo (2020), por sua vez, buscou investigar a influência de duas alterações – a implementação e a posterior interrupção do controle automotivo compulsório – sobre a incidência de doenças e óbitos vinculados à contaminação atmosférica,

entre 2008 e 2017 na cidade de São Paulo. Para tanto, empregou-se uma análise de sequências temporais interrompidas, utilizando a abordagem Arima e informações acessíveis em acervos oficiais. Os resultados detalharam diversas situações clínicas: registrou-se 229.337 hospitalizações por afecções respiratórias em crianças com até cinco anos, com 1.053 falecimentos. Para ataques cardíacos em indivíduos com mais de quarenta anos, foram contabilizadas 137.876 internações e 19.492 óbitos. Relativamente aos tumores malignos do sistema respiratório em adultos acima de quarenta anos, ocorreram 11.010 internações e 2.898 falecimentos. No caso de enfermidades pulmonares obstrutivas de longo curso em idosos acima de sessenta anos, somaram-se 20.807 internações e 2.627 óbitos. Por fim, para eventos cerebrovasculares, ocorreram 69.180 internações e 10.866 falecimentos. De modo geral, no que concerne a hospitalizações e mortes, nenhum índice de regressão relevante foi identificado para a implementação ou paralisação da iniciativa. Contudo, quanto à asma em crianças com até catorze anos (38.207 internações e 25 óbitos), os indicadores revelaram uma elevação de 0,05 óbitos por 100.000 habitantes/mês ($p = 0,01$) no período subsequente à implementação da fiscalização. Adicionalmente, em uma análise dos contaminantes $MP_{2,5}$ e CO, realizada em um ponto de vigilância na área central da cidade de São Paulo, não se verificou associação entre as concentrações aferidas e a introdução ou a interrupção da inspeção. As conclusões apontam que não houve comprovação que o programa tenha exercido qualquer impacto positivo perceptível na incidência de doenças e no número de falecimentos por afecções respiratórias e do sistema circulatório.

Já Freitas *et al.* (2004) realizaram um estudo que teve como propósito averiguar os impactos imediatos da contaminação ambiental na incidência de problemas respiratórios em crianças e adolescentes menores de 15 anos e nas taxas de óbitos de idosos, na metrópole de São Paulo, Brasil. Para tanto, os autores analisaram registros diários de internações hospitalares de jovens e de falecimentos de pessoas acima de 64 anos entre 1993 e 1997, em correspondência com as flutuações cotidianas de agentes poluentes no ar (MP_{10} , CO, O_3). A metodologia empregada para a análise consistiu na regressão de *Poisson* em modelos aditivos generalizados, os quais foram devidamente ajustados para considerar a evolução temporal, a periodicidade sazonal, os dias da semana, os condicionantes meteorológicos e a autocorrelação dos dados. As constatações revelaram que as variações entre o décimo e nonagésimo percentil dos poluentes estavam notavelmente associadas a um aumento nas hospitalizações por afecções respiratórias em menores de 15 anos para MP_{10} (%RR=10,0), CO (%RR=6,1) e O_3 (%RR=2,5). Um vínculo análogo foi constatado para a mortalidade em idosos com MP_{10} (%RR=8,1) e CO (%RR=7,9). Em síntese, os resultados alcançados estão em consonância com pesquisas que demonstram

uma relação entre as oscilações de breve duração dos contaminantes atmosféricos e o recrudescimento da morbidade e mortalidade nos grandes aglomerados urbanos.

Em 1995, Saldiva *et al.* analisaram, por regressão de séries temporais, com ajuste para sazonalidade, condições climáticas e outros elementos, a correlação entre a mortalidade diária de indivíduos idosos (com 65 anos ou mais) e a poluição atmosférica na Grande São Paulo, Brasil, entre maio de 1990 e abril de 1991. A mortalidade demonstrou vínculo com partículas respiráveis (MP₁₀), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e monóxido de carbono (CO). A relação com o MP₁₀ revelou-se a mais estatisticamente significativa, consistente e desvinculada de outros poluentes atmosféricos. Um incremento de 100 µg/m³ de MP₁₀ esteve associado a um aumento de cerca de 13% na mortalidade geral. Essa correlação manteve-se uniforme em diversas especificações de modelos e técnicas de estimativa. A relação dose-resposta entre a mortalidade e a poluição por material particulado respirável apresentou-se quase linear, sem qualquer indício de um nível de limite “seguro”. Os resultados foram análogos aos verificados em Londres e em diversas cidades dos EUA. Os achados também corroboraram outros estudos de sua época que identificaram desfechos adversos de saúde em animais experimentais expostos à poluição atmosférica em São Paulo.

Em 2014, Miraglia & Gouveia analisaram o impacto financeiro das repercussões na saúde vinculadas à contaminação atmosférica em áreas metropolitanas brasileiras. Com base na estimativa da mortalidade imputável às concentrações de material particulado em 29 Regiões Metropolitanas, as quais totalizaram 20.050 óbitos, os custos inerentes a essa mortalidade foram computados por meio da metodologia DALY (*Disability Adjusted Life Years*). O custo das mortes prematuras no Brasil atingiu a cifra de US\$ 1,7 bilhão anualmente. A conversão das perdas em saúde pública para valores monetários possibilitou a comparação com o orçamento de gastos do Ministério da Saúde e destacou as prioridades na formulação de políticas públicas aptas a minimizar a magnitude desses impactos.

Já Abe & Miraglia (2018) analisaram os principais determinantes de saúde propiciados pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), a evolução das concentrações de material particulado < 10 µm, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio e ozônio, e dados de saúde cardiorrespiratória da cidade de São Paulo, SP, Brasil, no período de 2000 a 2011. A metodologia adotada fundamentou-se na abordagem de Avaliação de Impacto na Saúde, por meio de levantamento bibliográfico e bases de dados públicas (Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde – DATASUS, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB). As concentrações dos poluentes MP < 10 µm, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre

apresentaram declínio ao longo do período de estudo, com a única exceção dos níveis de ozônio. A morbidade por doenças respiratórias registrou aumento no período, exceto as hospitalizações por asma. Observou-se redução na mortalidade cardiovascular, enquanto a taxa de mortalidade por DPOC permaneceu estável. Concluiu-se que o PROCONVE é um programa fundamental para a manutenção e mitigação das concentrações de poluentes atmosféricos.

Finalmente, Corá *et al.* (2020) observaram que o estado de São Paulo (ESP) ostenta a área mais industrializada do Brasil, detendo o maior Produto Interno Bruto (PIB) do país. Em decorrência das atividades industriais, muitos municípios desse estado vêm registrando níveis elevados de poluição atmosférica. O objetivo do estudo foi estimar a mortalidade cardiorrespiratória ocasionada pela poluição do ar em algumas cidades altamente industrializadas do ESP entre 2008 e 2016. Onze municípios (dos quais cinco localizados na RMSP) foram selecionados com base no consumo de energia elétrica industrial e na existência de, no mínimo, uma estação de monitoramento da poluição do ar. Utilizou-se um modelo da Organização Mundial da Saúde (OMS) para estimar o número de óbitos atribuíveis ao MP_{2,5} em cada município ao longo dos anos. Fundamentando-se no valor estatístico de uma vida, realizou-se uma avaliação econômica dos impactos na saúde. O município mais impactado pela poluição do ar foi Cubatão. Contudo, devido ao grande número de habitantes, São Paulo é o município onde o maior número de óbitos pode ser vinculado à exposição a poluentes particulados. Considerando os resultados obtidos para os 11 municípios, 43.512 óbitos puderam ser atribuídos à poluição do ar no período, o que representa uma perda superior a US\$ 48,3 bilhões. Esses resultados embasam a necessidade de pesquisas adicionais e a implementação de tecnologias mais limpas no parque industrial do estado de São Paulo.

Os estudos apresentados demonstram, de forma consistente, a associação entre a exposição a poluentes atmosféricos e uma ampla gama de desfechos adversos à saúde, incluindo mortalidade, doenças respiratórias e cardiovasculares. Utilizando desde experimentos com modelos animais até análises epidemiológicas em larga escala, as pesquisas reforçam que a composição química dos poluentes e fatores contextuais, como idade, sexo e localização, modulam a gravidade dos impactos.

3 MÉTODOS

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Este estudo, de delineamento longitudinal e baseado em dados agregados, configura-se como uma série temporal, cujo objetivo é investigar a relação entre os níveis de poluição atmosférica e as taxas de internação por doenças respiratórias crônicas (DRC totais, asma e DPOC) no município de São Caetano do Sul/SP, durante o período de 2010-2023. A análise foi realizada com base em dados secundários de fontes oficiais amplamente reconhecidas, incluindo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)¹, o Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS)², a Fundação SEADE³ e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)⁴.

3.2 ÁREA DO ESTUDO

O município de São Caetano do Sul, estrategicamente localizado na Região Metropolitana de São Paulo (Figura 1), por ser uma área de conexão intermunicipal para a região do ABCD Paulista, destaca-se como um município com alto desenvolvimento humano e notável qualidade de vida. Seu Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) está entre os mais elevados do Brasil, refletindo o acesso da população a serviços essenciais como educação, saúde e empregabilidade (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO [PNUD], 2025).

A qualidade de vida em SCS é frequentemente reconhecida em *rankings* e avaliações nacionais, impulsionada por fatores como segurança pública, eficiência nos serviços de saúde e educação, saneamento básico adequado e infraestrutura bem estabelecida (ÍNDICE FIRJAN DE DESENVOLVIMENTO MUNICIPAL [IFDM], 2025). A economia do município é diversificada, com forte presença nos setores de serviços, comércio e indústria, além de se beneficiar da proximidade com importantes polos econômicos da RMSP (ANVERSA, 2024).

¹ CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (<https://cetesb.sp.gov.br>).

² DATASUS – Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (<https://datasus.saude.gov.br>).

³ Fundação SEADE. SEADE municípios (<https://municipios.seade.gov.br>).

⁴ IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (<https://www.ibge.gov.br/>).

Figura 1 – Localização do município de São Caetano do Sul na Região Metropolitana de São Paulo.



Fonte: GEOUSP - Espaço e Tempo, São Paulo, n° 30, pp. 77-89, 2011.

Segundo o Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades – Brasil (IDSC-BR)⁵, uma iniciativa do Instituto Cidades Sustentáveis em parceria com o *Sustainable Development Solutions Network* (SDSN), consultoria do Centro Brasileiro de Análise e Planejamento (CEBRAP), a cidade de São Caetano do Sul atingiu, em 2025, um total de 65,67/100 pontos, ficando, assim, na segunda posição dentre os 5.570 municípios avaliados. Essa pontuação mede o progresso total das cidades para a realização de todos os 17 ODS. Uma pontuação de 100 indica a realização ótima dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

São Caetano do Sul apresenta um sistema educacional de alta qualidade, tanto em escolas públicas quanto privadas, refletido nos altos níveis de escolaridade da população (ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO BÁSICA [IDEB], 2025; INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA [INEP], 2025). Os serviços de saúde também são abrangentes e eficientes, contemplando hospitais, clínicas e postos de saúde bem equipados, contribuindo para uma

⁵ Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades (<https://idsc.cidadessustentaveis.org.br/rankings/>).

elevada expectativa de vida entre os moradores (SECRETARIA DA SAÚDE DE SÃO CAETANO DO SUL [SESAUD], 2025).

Em relação à segurança, SCS é consistentemente classificada como uma das cidades mais seguras do país, com baixos índices de criminalidade em comparação com outros municípios da RMSP (ANUÁRIO BRASILEIRO DE SEGURANÇA PÚBLICA, 2025). A infraestrutura urbana é bem desenvolvida, com ruas bem conservadas, saneamento básico eficiente e uma variedade de serviços públicos disponíveis para a população, consolidando o bem-estar dos cidadãos (PMSCS, 2025).

De acordo com o *ranking* do *Connected Smart Cities*⁶ (2024), São Caetano do Sul se posiciona na sétima colocação “geral”, 68º colocado no quesito “meio ambiente” e segundo quando considerado o eixo “saúde”. Esse *ranking* leva em conta o conceito de “conectividade”, ou seja, a relação existente entre os diversos setores analisados. O conceito de *Smart Cities* considerado entende que o desenvolvimento só é atingido quando os agentes de desenvolvimento da cidade compreendem o poder de conectividade entre todos os setores.

A composição étnica de SCS é predominantemente branca, embora haja diversidade cultural com a presença de outras etnias. A religião predominante é a católica, mas outras denominações também estão presentes (IBGE, 2018). A população demonstra engajamento político, refletido na participação eleitoral e cidadã (TRIBUNAL SUPERIOR ELEITORAL [TSE], 2022).

Na sequência, são apresentados alguns grupos de indicadores da cidade.

Indicadores Demográficos:

Segundo estimativas da Fundação SEADE, SCS abriga uma população de 165.652 habitantes, com uma densidade demográfica de 10.805,23 habitantes por km² (SEADE, 2024). A cidade apresenta uma taxa de crescimento populacional moderada, estimada em 1,93% ao ano (IBGE, 2022).

Indicadores Sociais:

O município se destaca pelo elevado IDHM, alcançando 0,862 em 2010, conforme o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). Adicionalmente, a cidade demonstra um notável equilíbrio social e uma taxa de pobreza de apenas 1,56%. Apesar disso, a distribuição de renda ainda apresenta desigualdades, conforme evidenciado pelo Índice de Gini de 0,548 (ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL, 2010).

⁶ *Ranking Connected Smart Cities 2024*

(<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojODhhNmI1ZWYtMmZmYy00NjVILTk4MjQtYjlmMTUxZTJlYTI0IiwidCI6IjA0ZTcxZThlTUwZDMtNDU1ZC04ODAzLWM3ZGI4ODhkNjRiYiJ9>).

Indicadores Econômicos:

São Caetano do Sul apresenta um Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* expressivo, atingindo R\$ 95.640,71 em 2021, conforme dados do IBGE. A economia local se mostra diversificada, com forte atuação nos setores de serviços, comércio e indústria (PMSCS, 2025). A taxa de desemprego na cidade é de 6,2% (SEADE, 2024), refletindo um mercado de trabalho relativamente estável.

Indicadores Educacionais:

A cidade se sobressai por seus altos níveis de educação, com uma taxa de alfabetização de 99,3% (IBGE, 2018). O Índice de Desenvolvimento da Educação Básica (IDEB) demonstra a qualidade do ensino, atingindo 7,5 nos anos iniciais (5º ano) e 7,0 nos anos finais (9º ano), de acordo com dados do INEP (2021). A cidade obteve a maior taxa de frequência escolar bruta entre municípios acima de 100 mil habitantes, tanto na faixa etária entre 4 e 5 anos (97,8%) quanto na faixa etária de 18 a 24 anos (49,8%). SCS possui também a maior proporção de população com ensino superior (48,2%) do País (PMSCS, 2025).

Indicadores de Saúde:

Os indicadores de saúde de SCS refletem o bem-estar da população, com uma baixa Taxa de Mortalidade Infantil (TMI), de 6,2 por mil nascidos vivos (DATASUS, 2021). A expectativa de vida ao nascer é de 79,6 anos (IBGE, 2020), refletindo boas condições de saúde e qualidade de vida. A cobertura de atenção básica alcança 82,76% da população (BRASIL, 2025). Observa-se uma tendência de envelhecimento populacional, o que demanda atenção para políticas de saúde e previdência. Historicamente, o município atraiu migrantes em busca de melhores condições de vida, embora o fluxo migratório tenha se equilibrado nos últimos anos (IBGE, 2018).

Indicadores Climáticos:

O clima em São Caetano do Sul é caracterizado por verões mornos, abafados, com precipitação e céu predominantemente encoberto, enquanto os invernos são amenos e com céu parcialmente encoberto. A temperatura ao longo do ano geralmente varia entre 13 °C e 28 °C, raramente caindo abaixo de 10 °C ou subindo acima de 32 °C (WEATHER SPARK, 2025).

A estação mais quente vai de meados de dezembro a março, com o mês de fevereiro sendo o mais quente, atingindo uma média de 28 °C de máxima e 20 °C de mínima. A estação mais fresca ocorre de meados de maio a meados de agosto, sendo julho o mês mais frio, com médias de 13 °C de mínima e 22 °C de máxima (WEATHER SPARK, 2025).

A precipitação também varia acentuadamente. A estação de maior precipitação dura de outubro a abril, com janeiro sendo o mês mais chuvoso, registrando uma média de 20,9 dias

com pelo menos 1 milímetro de chuva e um total de 218 milímetros de chuva. A estação seca se estende de abril a outubro, com agosto sendo o mês menos chuvoso, com apenas 5,7 dias de precipitação e 43 milímetros de chuva, em média. A precipitação predominante é em forma de chuva (WEATHER SPARK, 2025).

A umidade apresenta variação sazonal extrema. O período mais abafado é de outubro a abril, sendo janeiro o mês mais abafado, com cerca de 20,3 dias com sensação de abafamento. Julho é o mês com menos dias abafados. Os ventos têm variações sazonais pequenas. A época de ventos mais fortes ocorre de agosto a dezembro, com outubro registrando a maior velocidade média (13,6 km/h). O mês mais calmo é fevereiro (10,7 km/h). A direção predominante do vento varia entre norte (junho-julho) e leste (julho-junho) (WEATHER SPARK, 2025).

3.3 POPULAÇÃO E PERÍODO DO ESTUDO

Para efeito deste estudo, foi considerada toda a população residente em SCS no período de 2010 até 2023. O ano de 2010 foi escolhido como o ponto inicial por ser um ano censitário. Já 2023 foi selecionado como o último ano por disponibilizar dados completos até o final desse período, permitindo também a inclusão de 2022, ano do mais recente Censo Demográfico.

3.4 FONTES DE DADOS E PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

Os dados de poluição atmosférica foram obtidos do site da CETESB⁷, órgão responsável pelo monitoramento da qualidade do ar no estado de São Paulo. Foram coletados dados diários das concentrações dos seguintes poluentes, considerados relevantes para a saúde:

- ✓ Material Particulado Inalável (MP₁₀);
- ✓ Ozônio (O₃);
- ✓ Dióxido de Nitrogênio (NO₂).

Os dados foram coletados para todas as estações de monitoramento da CETESB que possuísem registros completos e consistentes durante o período de estudo (ou seja, que apresentassem um mínimo de 70% de registros dentro do período analisado).

Os dados de internações e mortes por doenças respiratórias crônicas – asma, DPOC e total das DRC – foram obtidos do site do DATASUS⁸, que contém bancos de dados do Sistema Único de Saúde (SUS). Foram extraídos dados mensais do número de internações para cada

⁷ CETESB – Sistema de Informações da Qualidade do Ar - QUALAR (<https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>).

⁸ DATASUS – Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (<https://datasus.saude.gov.br/>).

uma das seguintes categorias, codificadas segundo a Classificação Internacional de Doenças (CID-10):

- ✓ Asma (CID-10: J45 e J46);
- ✓ Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (CID-10: J44);
- ✓ DRC – Doenças Respiratórias Crônicas (CID-10: J41, J42, J44, J45, J46, J47 e J96.1).

Os dados foram coletados para todos os residentes de São Caetano do Sul, ou seja, abrangendo todas as faixas etárias e ambos os sexos, de modo a possibilitar a estratificação segundo essas categorias *a posteriori*.

3.5 PROCEDIMENTOS DE TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

3.5.1 Preparação dos Dados

Os dados de poluição atmosférica foram organizados em séries temporais mensais, abrangendo o período de estudo – 2010 a 2023. Para cada poluente, foi calculada a média diária de concentração em cada estação de monitoramento. Posteriormente, essas médias diárias foram agregadas para se obter a média mensal de cada poluente em todo o município de SCS.

As taxas mensais de internações (por 100.000 habitantes) foram calculadas para o mesmo período, utilizando a população residente estimada para cada ano, disponibilizada pela Fundação SEADE. Essas taxas foram também estratificadas segundo as doenças respiratórias específicas e para cada faixa etária e sexo dos residentes de São Caetano do Sul.

3.5.2 Etapa Descritiva

Foram elaborados gráficos de séries temporais para ilustrar a evolução das concentrações de poluentes específicos e das taxas de internação ao longo do tempo. Essa análise incluiu também a caracterização das taxas de internações por DPOC, asma e doenças respiratórias crônicas consolidadas na população de São Caetano do Sul, segundo sexo, faixa etária, doença respiratória e mês/ano de ocorrência.

3.5.3 Análise de Correlação

A correlação entre as concentrações mensais de cada poluente e as taxas de internação mensais por asma, DPOC e total de doenças respiratórias foi avaliada utilizando o coeficiente de correlação de *Pearson* (r) ou *Spearman* (ρ), conforme os dados apresentassem ou não distribuição normal, respectivamente. O coeficiente de correlação mede a força e a direção da associação linear entre duas variáveis contínuas. Seus valores variam de -1 a +1, onde:

- ✓ r ou $\rho = +1$: indica uma correlação positiva perfeita.
- ✓ r ou $\rho = -1$: indica uma correlação negativa perfeita.
- ✓ r ou $\rho = 0$: indica ausência de correlação linear.

As magnitudes das correlações foram classificadas da seguinte forma: muito fracas (0,00 a 0,19), fracas (0,20 a 0,39), moderadas (0,40 a 0,59), fortes (0,60 a 0,79) e muito fortes (0,80 a 1,00). Considerou-se estatisticamente significativa toda correlação com valor de $p < 0,05$, adotando-se o nível de significância (α) de 5%.

3.5.4 Análise de Séries Temporais

Séries temporais representam sequências de dados coletados ou registrados em intervalos regulares de tempo (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018). A análise de séries temporais é uma área fundamental da estatística e da econometria, que emprega métodos estatísticos para examinar esses dados com o objetivo de identificar padrões, tendências e relações significativas (BOX *et al.*, 2015). Essa análise permite prever valores futuros com base em observações passadas, modelar interações entre variáveis ao longo do tempo e compreender padrões e tendências subjacentes nos dados (SHUMWAY; STOFFER, 2017). Uma série temporal é geralmente composta por quatro componentes principais, que podem se combinar de forma aditiva ou multiplicativa (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018):

- ✓ Tendência (*Trend*): Representa o movimento de longo prazo da série temporal, que pode ser ascendente, descendente ou estável, refletindo a direção geral dos dados ao longo do tempo (BOX *et al.*, 2015).
- ✓ Sazonalidade (*Seasonality*): Consiste em padrões regulares e repetitivos que se manifestam em intervalos fixos de tempo (por exemplo, diariamente, mensalmente, anualmente) (SHUMWAY; STOFFER, 2017).

- ✓ Ciclos (*Cycles*): Referem-se a flutuações que ocorrem em intervalos de tempo mais longos e irregulares do que a sazonalidade, geralmente associados a fatores econômicos ou sociais (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018).
- ✓ Irregularidade (*Irregularity*/Resíduo): Corresponde à variação aleatória ou ruído nos dados que não pode ser explicada pelos componentes de tendência, sazonalidade ou ciclos (BOX *et al.*, 2015).

3.5.5 Análise de Causalidade de Granger

O teste de causalidade de Granger aplicado a dados em painel permite identificar a dinâmica causal entre duas variáveis, fundamentando-se na premissa da anterioridade temporal estatisticamente significativa. Portanto, a análise não pressupõe um nexos determinante de causa e efeito, mas demonstra que os valores defasados de uma variável oferecem ganho de informação para antecipar a trajetória da variável dependente. (CARNEIRO, 1997). Esse teste foi realizado visando aumentar a profundidade do estudo a partir dos achados da correlação linear das variáveis.

3.5.6 *Softwares* Utilizados na Pesquisa

- ✓ *Microsoft Excel* para *Mac* (versão 16.95, 2025): organização, mineração e preparação inicial dos dados.
- ✓ *Google Colab* (versão 2026): análises estatísticas, modelagem de dados e elaboração de gráficos, figuras e tabelas.

3.6 CONSIDERAÇÕES ÉTICAS

Este estudo utiliza dados secundários de domínio público, garantindo o anonimato e a confidencialidade dos sujeitos da pesquisa. Assim, dispensa a aprovação de um Comitê de Ética em Pesquisa (CEP). No entanto, todos os dados foram tratados com rigor científico e em conformidade com as diretrizes éticas para pesquisas em saúde pública, conforme a Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012⁹, que aprova as diretrizes e normas regulamentadoras de

⁹ Resolução CNS (Conselho Nacional de Saúde) nº 466, de 12 de dezembro de 2012 (<https://www.gov.br/conselho-nacional-de-saude/pt-br/acesso-a-informacao/atos-normativos/resolucoes/2012/resolucao-no-466.pdf/view>).

pesquisas envolvendo seres humanos, e a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD)¹⁰ – Leis nº 13.709, de 14 de agosto de 2018, e nº 13.853, de 8 de julho de 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos objetivos propostos, os resultados do estudo são apresentados a seguir.

4.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS INTERNAÇÕES POR DOENÇAS RESPIRATÓRIAS CRÔNICAS EM SÃO CAETANO DO SUL

4.1.1 Internações por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC)

Durante o período de 2010 a 2023, foram registradas 2.994 internações por DRC nos hospitais do sistema público de saúde de São Caetano do Sul. A distribuição desses casos por gênero revela que o masculino é o mais afetado, concentrando a maioria das internações, com 1.600 ocorrências (53,44% do total). Já o grupo feminino registrou 1.394 internações (46,56%). No geral, os homens representaram a maioria das internações por DRC, porém, com uma distribuição de gênero relativamente equilibrada.

Ao analisar as séries temporais anuais, observa-se flutuações nas taxas de internações por DRC. O ano de 2013 registrou o maior número de internações (261), e o ano de 2020 o menor número (76 registros). Essa queda acentuada em 2020 pode estar relacionada a fatores como as medidas de distanciamento social e o uso de máscaras durante a pandemia de COVID-19, que podem ter reduzido a exposição a agentes poluentes.

Em suma, a análise dos dados de DRC demonstra que a doença possui uma distribuição de gênero próxima da paridade. As tendências anuais e mensais mostram variações, com um pico em 2013 e notável redução em 2020 (Tabelas 1 e 2).

¹⁰ LGPD - Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/l13709.htm).

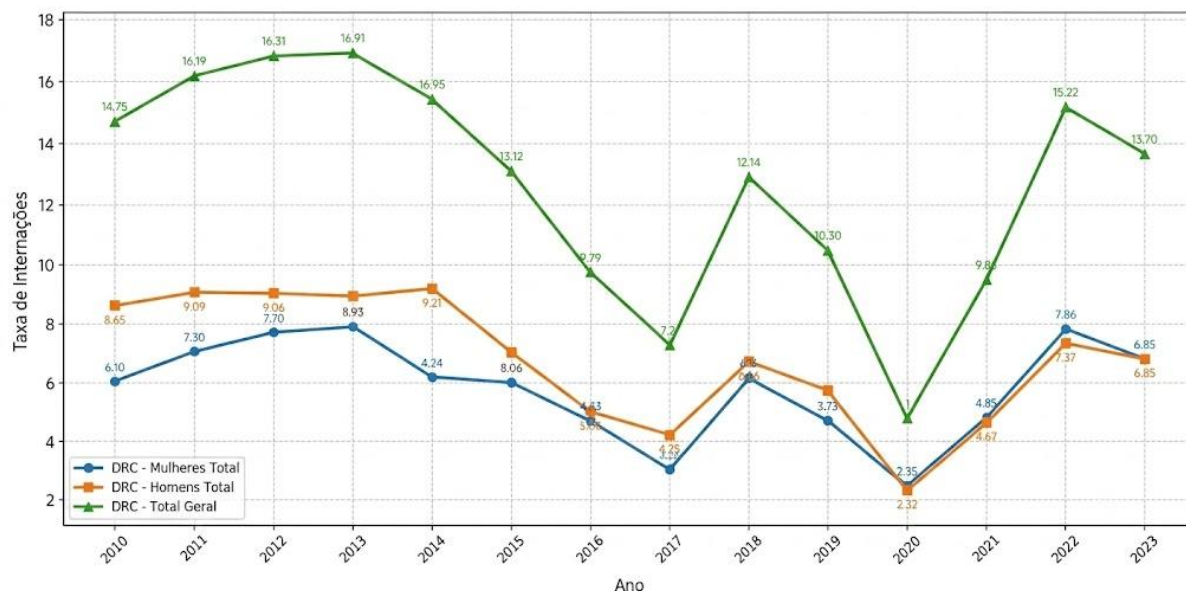
Tabela 1 – Casos registrados de internações por DRC segundo mês e ano de internação em hospitais do sistema público de saúde de São Caetano do Sul, SP, 2010-2016.

Mês	Ano														
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Janeiro	12	8	11	13	11	10	3	9	9	5	7	3	8	14	123
Fevereiro	9	10	18	17	13	23	14	8	17	9	16	7	15	42	218
Março	22	26	21	29	14	29	11	11	22	10	10	5	20	23	253
Abril	27	31	32	26	18	28	13	15	12	16	2	5	28	21	274
Maio	24	31	17	23	36	23	10	7	16	15	1	9	26	16	254
Junho	21	17	27	17	29	27	15	4	24	20	5	9	17	11	243
Julho	11	17	25	23	19	10	15	8	19	15	6	16	13	18	215
Agosto	12	20	30	30	23	15	17	9	13	19	6	23	31	26	274
Setembro	17	22	22	25	16	12	18	10	23	11	7	20	24	12	239
Outubro	29	29	19	20	25	11	14	18	14	16	4	24	20	19	262
Novembro	26	15	23	24	16	8	14	8	20	17	9	20	21	15	236
Dezembro	12	15	15	14	20	8	9	15	17	14	3	30	20	6	198
Total	222	241	260	261	240	204	153	122	206	167	76	171	243	223	2789

Tabela 2 – Resumo das tendências e médias anuais de internações por DRC por períodos. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

Período	Tendência Principal	Média Anual	Destaques
2010–2014	Alta / Estável	248,8	Pico da série em 2013 (261)
2015–2020	Queda Acentuada	149,0	Menor valor histórico em 2020 (76)
2021–2023	Retomada / Elevação	213,0	Pico mensal em fev/2023 (42)

Figura 2 – Evolução das taxas de internação por DRC no sexo masculino (por 100.000 homens), sexo feminino (por 100.000 mulheres) e total (por 100.000 habitantes), segundo ano de internação. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.



4.1.2 Internações por Asma

A análise descritiva das internações por asma, abrangendo o período de janeiro de 2010 a dezembro de 2023, revela um panorama detalhado dessa condição ao longo de 14 anos no município de SCS. Durante esse período, foram registrados 1.570 casos de internações por asma em estabelecimentos do sistema público de saúde (Tabela 3).

A distribuição desses casos por faixa etária e gênero aponta uma concentração em determinados grupos. A maioria das ocorrências, especificamente 94,01% do total (1.476 internações), concentrou-se na faixa etária de 0 a 14 anos. Nesse grupo, há uma predominância masculina, com 843 homens e 633 mulheres. Em contraste, a faixa etária de 15 a 59 anos representa uma parcela muito pequena dos casos internados, apenas 3,50% do total (55 casos), sendo 14 homens e 41 mulheres. Já entre os indivíduos com 60 anos e mais, que correspondem a 2,48% do total (39 casos), observa-se também um predomínio feminino, com 11 homens e 28 mulheres. Somando todas as idades, os homens representam 55,29% (868 casos) e as mulheres 44,71% (702 casos) do total de internações por asma em estabelecimentos vinculados ao SUS (Figuras 3, 4 e 5).

Figura 3 – Evolução das taxas de internação por asma no sexo feminino (por 100.000 mulheres), segundo faixa etária e ano de internação. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

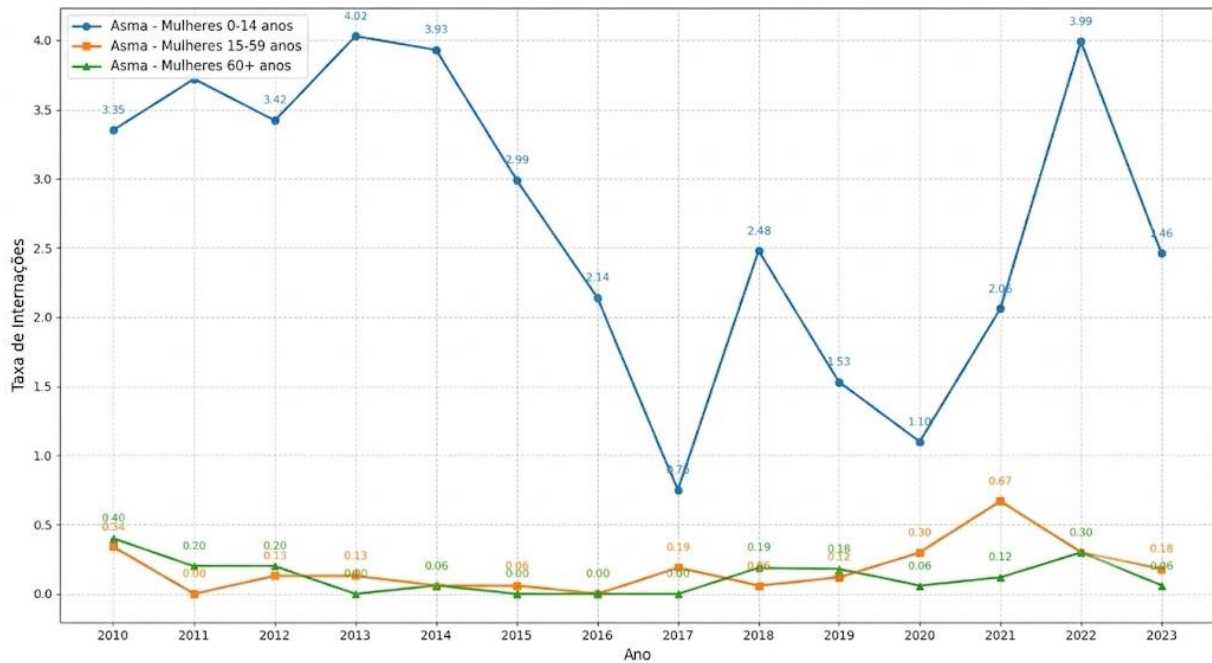


Figura 4 – Evolução das taxas de internação por asma no sexo masculino (por 100.000 homens), segundo faixa etária e ano de internação. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

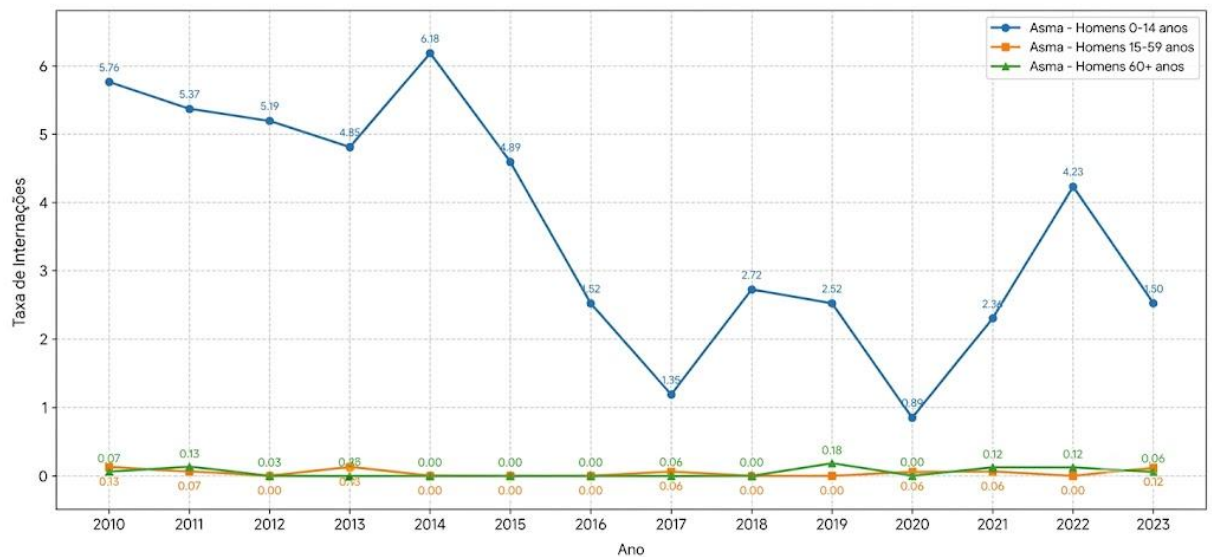
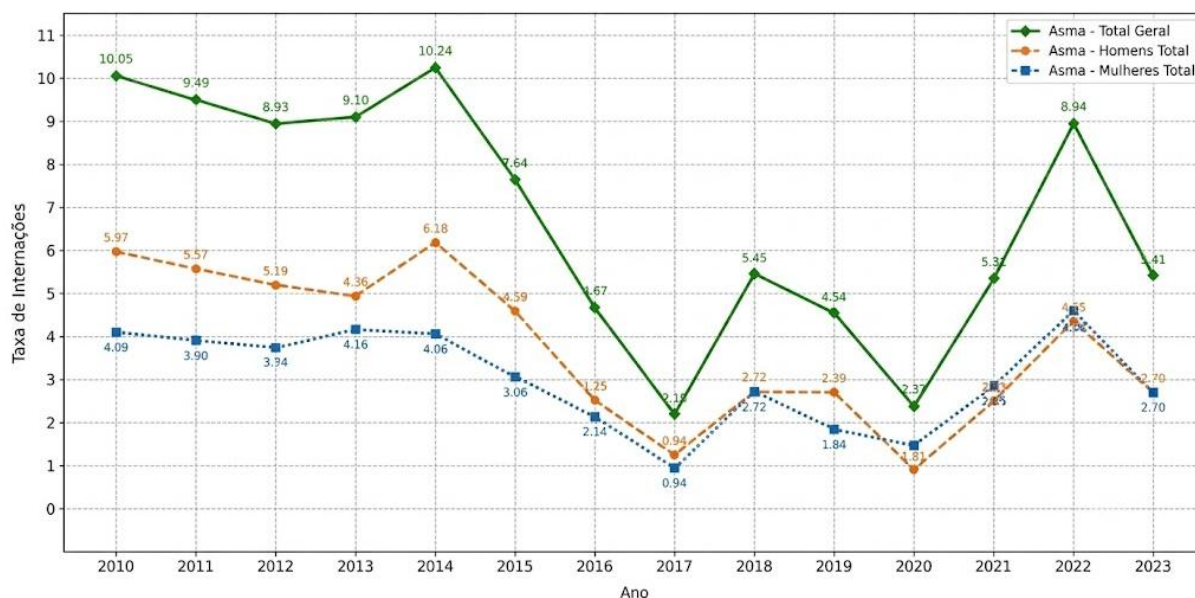


Figura 5 – Evolução das taxas de internação por asma no sexo masculino (por 100.000 homens), sexo feminino (por 100.000 mulheres) e total (por 100.000 habitantes) segundo ano da internação. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.



Em termos de picos mensais, o maior número de internações em um único mês foi 26, registrado em maio de 2014. Quanto aos menores valores mensais, foram observados alguns meses sem nenhuma internação, o que aconteceu em janeiro de 2018 e 2019, e novamente em maio de 2020 (Tabela 3).

Tabela 3 – Casos registrados de internações por asma segundo mês e ano de internação em hospitais do sistema público de saúde de São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

Mês	Ano														
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Janeiro	7	4	2	3	4	6	1	1	0	0	4	1	1	1	35
Fevereiro	3	8	10	13	6	19	9	4	11	2	10	1	11	19	126
Março	16	19	11	22	7	20	6	3	10	5	3	4	13	13	152
Abril	22	20	17	17	14	16	5	4	7	8	1	2	21	5	159
Maio	19	20	12	14	26	12	6	1	5	5	0	6	21	9	156
Junho	12	8	10	7	19	14	8	2	7	7	3	7	6	6	116
Julho	7	8	16	6	14	6	4	4	9	6	5	10	6	6	107
Agosto	9	11	21	16	13	10	5	4	8	9	4	12	16	11	149
Setembro	9	12	9	10	15	3	9	1	9	8	1	14	13	4	117
Outubro	21	15	12	16	17	5	7	5	5	7	2	8	9	7	136
Novembro	20	9	9	13	10	4	6	4	9	11	3	12	17	7	134
Dezembro	4	7	6	8	13	5	5	4	7	5	2	15	10	2	93
Total	149	141	135	145	158	120	71	37	87	73	38	92	144	90	1480

As análises temporais revelam flutuações anuais e mensais nas internações por asma. O ano de 2014 registrou o maior número de internações, com 158 ocorrências, representando um pico na série histórica. Por outro lado, 2017 apresentou o menor número de internações, com apenas 37 registros (Tabela 4).

Tabela 4 – Resumo das tendências e médias anuais de internações por asma por períodos. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

Período	Tendência Principal	Média Anual	Destaques
2010–2014	Alta / Estável	145,6	Maior valor mensal em maio/2014 (26); pico anual em 2014 (158)
2015–2020	Queda Acentuada	71,0	Menores totais anuais em 2017 (37) e 2020 (38)
2021–2023	Retomada / Elevação	108,7	Recuperação em 2022 (144); picos em abr-mai/2022 (21) e fev/2023 (19)

Em suma, a internação por asma, conforme os dados analisados, afetou predominantemente crianças e adolescentes até 14 anos, com uma ocorrência ligeiramente maior no sexo masculino nesse grupo.

4.1.3 Internações por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC)

Durante o período de 2010 a 2023, ocorreram 1.424 internações por DPOC nos hospitais do sistema público de saúde de São Caetano do Sul. A distribuição das internações por DPOC por faixa etária e gênero denota que a faixa de 60 anos e mais foi a mais afetada, com 1.147 ocorrências (80,55% do total). Nesse grupo, houve uma leve predominância de homens, com 584 internações, em comparação com 563 internações em mulheres. A faixa etária de 0 a 14 anos respondeu por 126 casos (8,85%), com 74 homens e 52 mulheres. Já o grupo de 15 a 59 anos registrou 151 internações (10,60%), com 74 homens e 77 mulheres, sendo a única faixa etária onde as mulheres superaram ligeiramente os homens em número de internações. No total de internações por DPOC, os homens responderam por 51,40% (732) e as mulheres 48,60% (692), indicando uma distribuição de gênero relativamente equilibrada, com uma ligeira predominância masculina (Figuras 6, 7 e 8).

Figura 6 – Evolução das taxas de internação por DPOC no sexo feminino (por 100.000 mulheres), segundo faixa etária e ano de internação. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

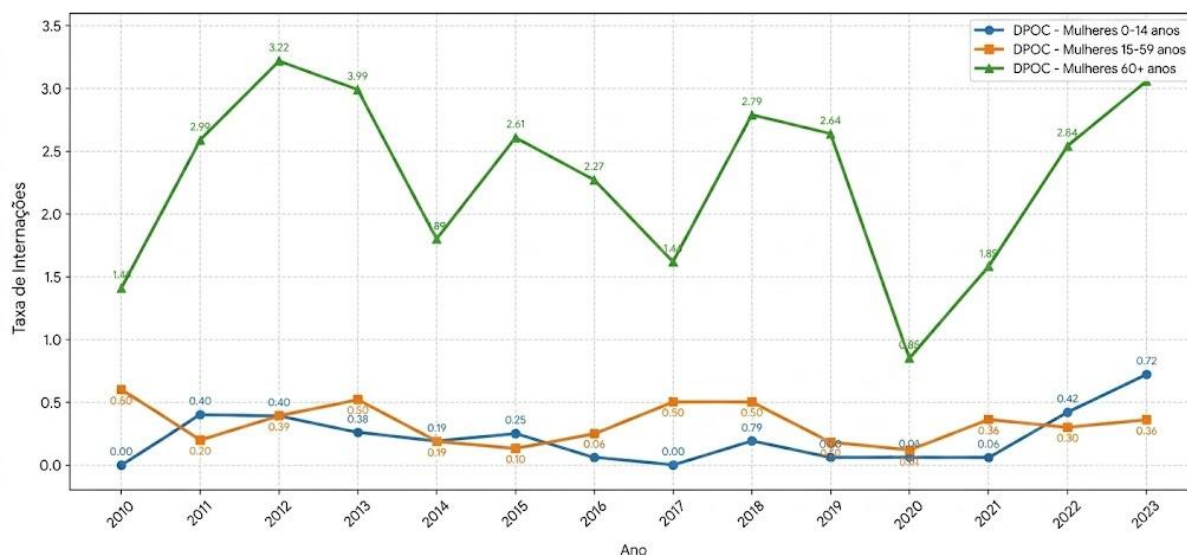


Figura 7 – Evolução das taxas de internação por DPOC no sexo masculino (por 100.000 homens), segundo faixa etária e ano de internação. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

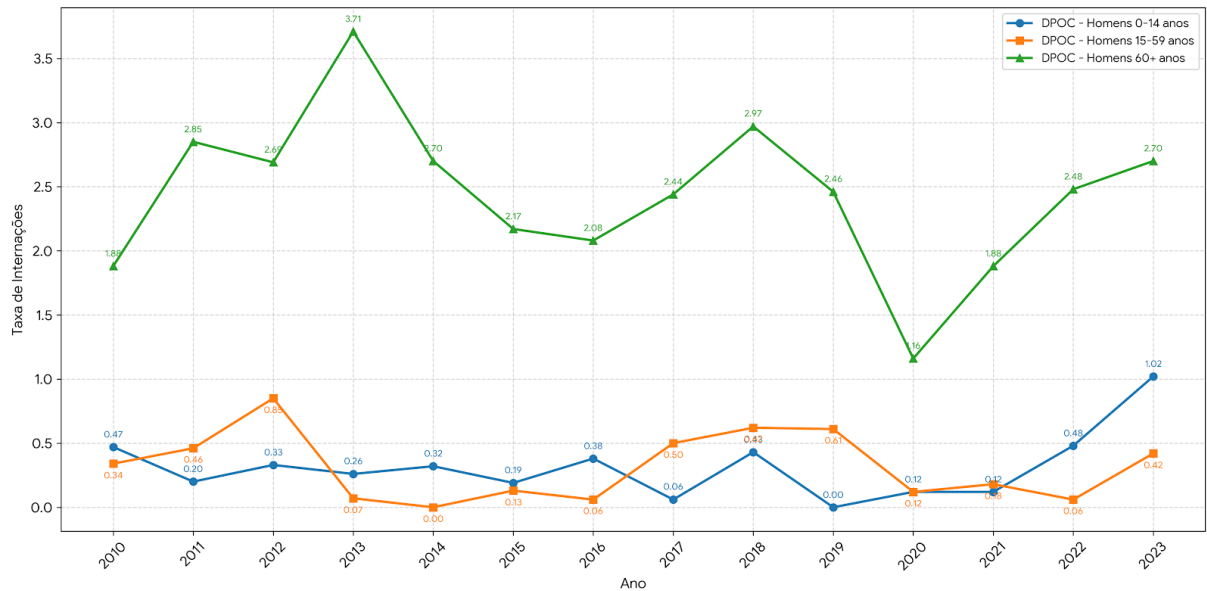
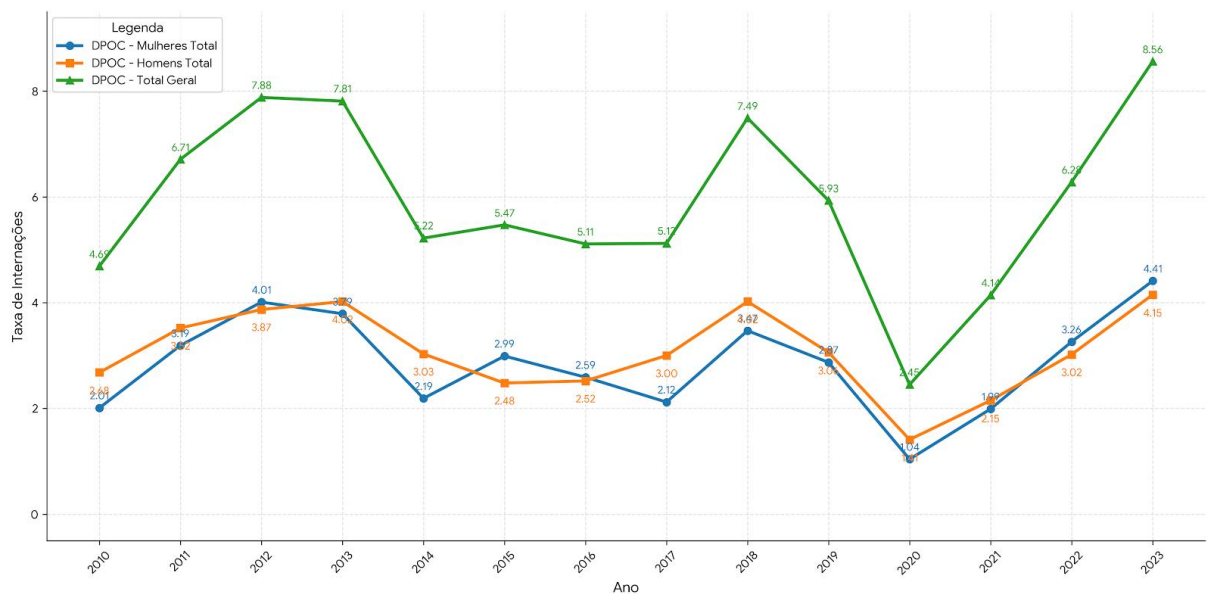


Figura 8 – Evolução das taxas de internação por DPOC no sexo masculino (por 100.000 homens), sexo feminino (por 100.000 mulheres) e total (por 100.000 habitantes) segundo ano de internação. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.



Ao analisar as series temporais anuais, observam-se flutuações nas taxas de internações por DPOC. O ano de 2023 registrou o maior número de internações – 133 ocorrências – indicando um aumento recente. Em contrapartida, o ano de 2020 apresentou o menor número de internações (38 registros). Essa queda acentuada em 2020 pode estar relacionada a fatores como as medidas de distanciamento social e o uso de máscaras durante a pandemia de COVID-19, que podem ter reduzido a exposição poluentes, influenciando a incidência de complicações das doenças respiratórias crônicas. No que tange à análise mensal, o maior número de internações em um único mês foi 26 internações, registradas em fevereiro de 2023.

Em suma, a análise dos dados de internações por DPOC denota predominância na população idosa (acima de 59 anos), com uma distribuição de gênero próxima da paridade. As tendências anuais e mensais mostram variações, com um pico recente em 2023 e uma notável redução em 2020 (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5 – Casos registrados de internações por DPOC segundo mês e ano de internação em hospitais do sistema público de saúde de São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

Mês	Ano														Total
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Janeiro	5	4	9	10	7	4	2	8	9	5	3	2	7	13	88
Fevereiro	6	2	8	4	7	4	5	4	6	7	6	6	4	23	92
Março	6	7	10	7	7	9	5	8	12	5	7	1	7	10	101
Abril	5	11	15	9	4	12	8	11	5	8	1	3	7	16	115
Mai	5	11	5	9	10	11	4	6	11	10	1	3	5	7	98
Junho	9	9	17	10	10	13	7	2	17	13	2	2	11	5	127
Julho	4	9	9	17	5	4	11	4	10	9	1	6	7	12	108
Agosto	3	9	9	14	10	5	12	5	5	10	2	11	15	15	125
Setembro	8	10	13	15	1	9	9	9	14	3	6	6	11	8	122
Outubro	8	14	7	4	8	6	7	13	9	9	2	16	11	12	126
Novembro	6	6	14	11	6	4	8	4	11	6	6	8	4	8	102
Dezembro	8	8	9	6	7	3	4	11	10	9	1	15	10	4	105
Total	73	100	125	116	82	84	82	85	119	94	38	79	99	133	1309

Tabela 6 – Resumo das tendências e médias anuais de internações por DPOC por períodos. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

Período	Tendência Principal	Média Anual Aprox.	Destaques
2010–2014	Alta / Estável	99,2	Pico do período em 2012 (125); picos mensais em jun/2012 e jul/2013 (17 cada)
2015–2020	Queda / Oscilação Moderada	83,7	Menor total anual da série em 2020 (38); pico em jun/2018 (17)
2021–2023	Retomada / Elevação	103,7	Maior valor mensal de toda a série em fev/2023 (23); pico anual em 2023 (133)

4.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS POLUENTES AMBIENTAIS EM SÃO CAETANO DO SUL

4.2.1 Material Particulado 10 (MP₁₀)

A análise descritiva dos níveis de MP₁₀ entre janeiro de 2010 e dezembro de 2023 revela importantes tendências na qualidade do ar. O conjunto de dados fornecido incluiu informações mensais sobre o número de dias com medições, a média diária de MP₁₀, o valor máximo registrado e o número de vezes em que os níveis de MP₁₀ excederam um limite de referência (50 µg/m³ para a média diária).

Ao longo do período analisado, identificou-se um total de 220 ocorrências (de 5.110) em que os níveis de MP₁₀ estiveram acima do limite de referência. A média global dos valores médios diários de MP₁₀ ficou em aproximadamente 30 µg/m³. Os extremos de medição incluem uma média diária mínima de 16 µg/m³ (fevereiro de 2020), e uma média diária máxima de 60 µg/m³ (agosto de 2015) (Tabela 7). O valor instantâneo mais alto do poluente atingiu 135 µg/m³ em agosto de 2010, enquanto o menor valor instantâneo foi de 22 µg/m³ em fevereiro de 2020.

A análise anual das ocorrências de MP₁₀ acima do limite mostra uma variação considerável. Os anos de 2010 e 2011 destacam-se com o maior número de registros fora do limite, com 60 e 69 ocorrências, respectivamente. Por outro lado, 2023 registrou o menor número de ocorrências acima do limite, com 20 registros. A média anual de MP₁₀ também

demonstrou essa tendência, com valores mais elevados no início da década (2010-2014) e uma diminuição gradual observada em anos mais recentes (2022-2023).

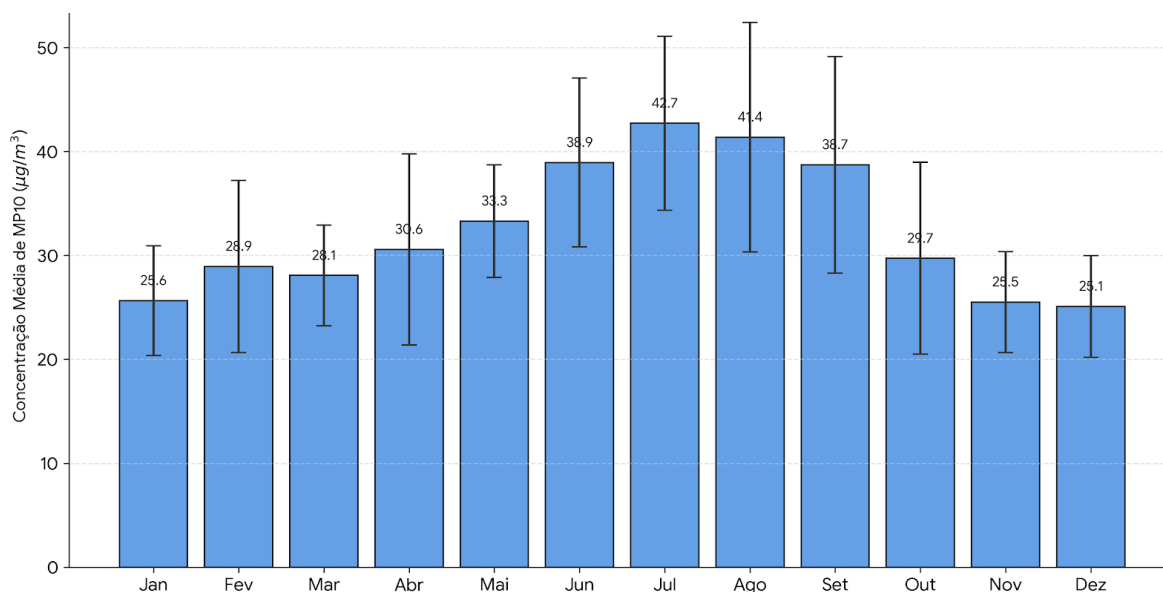
Em relação às análises mensais, o mês de agosto de 2010 se sobressaiu com o maior número de registros acima do limite em um único mês, com 14 ocorrências, e também o maior valor máximo de MP₁₀ registrado (135 µg/m³). Historicamente, meses como junho, julho, agosto e setembro tenderam a apresentar um número mais elevado de ocorrências de MP₁₀ acima do limite. Em contrapartida, os meses de fevereiro, novembro e dezembro, especialmente em anos mais recentes, geralmente mostraram menos registros de excedência, com valores médios e máximos de MP₁₀ mais baixos (Figura 9).

Em síntese, a análise dos dados de MP₁₀ revelou uma dinâmica complexa na qualidade do ar. Observou-se que os primeiros anos da série foram mais críticos em termos de poluição por material particulado, com uma tendência de melhoria nos anos mais recentes, culminando em 2023 com o menor número de excedências. Fatores sazonais também se evidenciam, com os meses de verão e início do outono apresentando maior criticidade.

Tabela 7 – Valores médios mensais de Material Particulado 10 (MP₁₀) segundo mês e ano. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

Mês	Ano														
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Janeiro	28	35	27	26	33	32	28	23	21	26	22	21	19	18	359
Fevereiro	32	39	40	33	41	31	34	31	23	22	16	22	24	17	405
Março	35	27	35	28	29	36	32	22	26	29	23	25	23	23	393
Abril	34	35	32	39	29	35	54	22	30	32	24	19	23	20	428
Mai	38	36	30	46	38	37	33	28	33	30	30	34	26	27	466
Junho	49	55	38	42	46	46	39	34	39	36	31	27	27	36	545
Julho	44	54	54	38	42	48	54	36	50	39	29	39	41	30	598
Agosto	58	44	49	49	49	60	46	38	25	30	31	38	28	34	579
Setembro	50	41	56	39	40	49	27	52	27	27	42	36	24	32	542
Outubro	32	34	46	32	46	39	22	29	19	26	30	18	22	21	416
Novembro	30	32	31	29	29	31	25	23	19	21	21	22	18	26	357
Dezembro	26	32	34	25	28	30	27	23	25	22	17	20	19	23	351
Total	456	464	472	426	450	474	421	361	337	340	316	321	294	307	5439

Figura 9 – Valores médios mensais de Material Particulado 10 (MP10). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.



4.2.2 Dióxido de Nitrogênio (NO₂)

A análise detalhada dos níveis de Dióxido de Nitrogênio (NO₂), baseada nos dados consolidados do período de janeiro de 2010 a dezembro de 2023, revela que a qualidade do ar em relação a esse poluente mostrou variações. Durante os 14 anos, foram registradas 13 ocorrências (entre 5.110) em que os níveis de NO₂ excederam o limite de referência (200 µg/m³/dia). A média geral dos valores diários de NO₂ ficou em aproximadamente 60 µg/m³, com o valor mais baixo atingindo 35 µg/m³ em vários meses de 2020 e 2021, e o mais alto alcançando 104 µg/m³ em setembro de 2015 (Tabela 8). O pico instantâneo de NO₂ registrado foi de 301 µg/m³ em junho de 2012, enquanto o mínimo foi de 4 µg/m³ em abril de 2020.

Os anos de 2010 e 2011 foram os que apresentaram mais desafios, com três ocorrências de NO₂ acima do limite em cada ano. Por outro lado, anos mais recentes, como 2014, 2016, 2017, 2019, 2020 e 2023, não registraram nenhuma excedência, indicando períodos de melhor qualidade do ar. A média anual de NO₂ tem flutuado, com valores um pouco mais altos entre 2014 e 2015, e uma tendência de queda observada nos anos mais recentes, como 2020 e 2023.

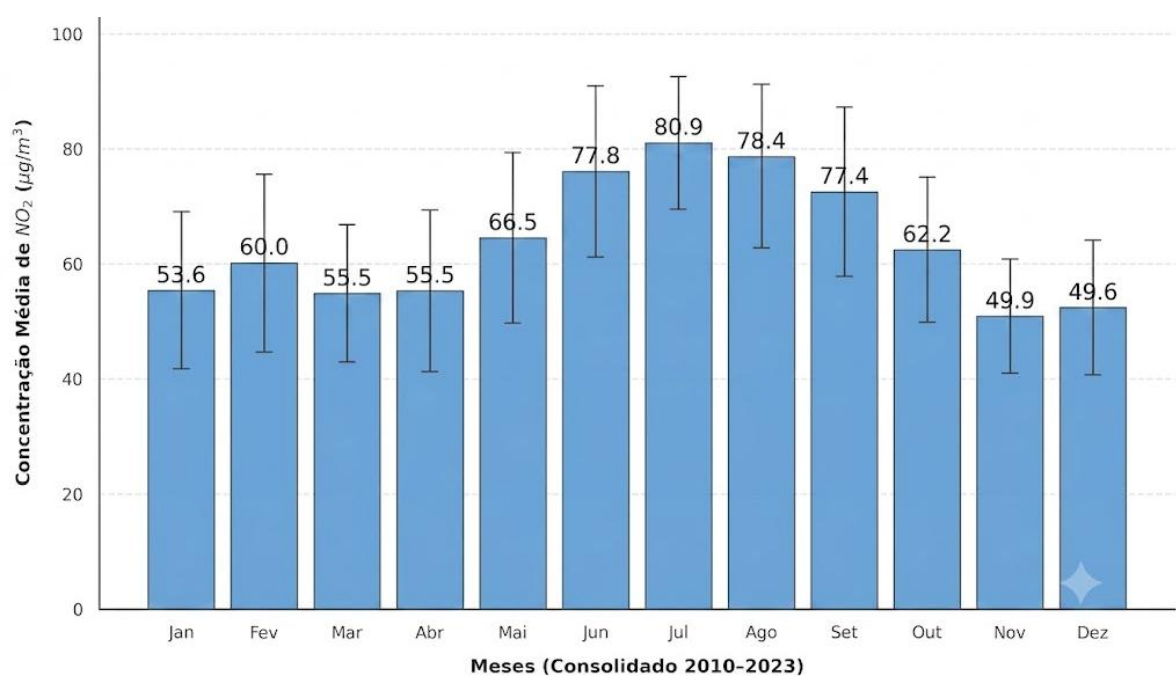
Em termos de sazonalidade, o mês de outubro se destaca com o maior número de ocorrências acima do limite ao longo dos anos, e também registrou uma das maiores médias mensais de NO₂. Em contraste, o mês de dezembro apresenta historicamente a menor média de NO₂, sugerindo uma melhor qualidade do ar nesse período (Figura 10).

Em resumo, a análise dos dados de NO₂ indicou uma variação na qualidade do ar ao longo do tempo, com períodos iniciais mais críticos e uma aparente melhoria em anos mais recentes, além de influências sazonais marcantes.

Tabela 8 – Valores médios mensais de Dióxido de Nitrogênio (NO₂) segundo mês e ano. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023

Mês	Ano														
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Janeiro	72	70	53	52	80	65	46	56	52	68	45	35	45	37	776
Fevereiro	82	80	71	74	79	67	60	63	45	45	43	43	45	45	842
Março	69	44	67	60	67	68	61	53	59	35	35	43	59	49	769
Abril	64	72	66	80	67	52	67	46	54	49	37	35	47	39	775
Maio	80	52	61	103	85	60	50	64	58	60	53	64	56	58	904
Junho	99	44	90	84	88	93	69	74	75	79	62	59	68	81	1065
Julho	84	92	101	77	80	100	75	74	94	75	65	73	78	67	1135
Agosto	93	79	81	87	98	99	78	79	66	61	55	78	58	67	1079
Setembro	85	72	81	77	78	104	54	87	57	53	70	77	55	66	1016
Outubro	61	70	81	67	83	77	56	69	52	51	64	43	48	53	875
Novembro	60	55	52	57	61	69	54	55	46	38	41	39	35	51	713
Dezembro	58	69	63	-	58	65	64	52	56	40	35	40	38	44	682
Total	907	799	867	818	924	919	734	772	714	654	605	629	632	657	10631

Figura 10 – Valores médios mensais de Dióxido de Nitrogênio (NO₂). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.



4.2.3 Ozônio (O₃)

A análise dos níveis de Ozônio (O₃), baseada nos dados consolidados do período de janeiro de 2010 a dezembro de 2023, oferece uma perspectiva abrangente sobre a presença desse poluente na atmosfera. Ao longo desses anos, foram registradas 213 ocorrências (entre 5.110) em que os níveis de O₃ estiveram acima do limite de referência (100 µg/m³), indicando desafios significativos na qualidade do ar. A média geral dos valores diários de O₃ foi aproximadamente 71 µg/m³. Os valores extremos para a média diária variaram de um mínimo de 31 µg/m³ (junho de 2012) a um máximo de 127 µg/m³ (fevereiro de 2012). (Tabela 9). O pico instantâneo de O₃ registrado foi de 216 µg/m³, também em fevereiro de 2012, enquanto o mínimo foi de 61 µg/m³ em junho de 2015.

Os anos de 2010, 2011 e 2012 se destacaram com o maior número de ocorrências de O₃ acima do limite, somando 64, 86 e 76 registros, respectivamente, o que aponta para um período mais crítico no início da série histórica. Embora 2022 tenha apresentado o menor número de ocorrências excedentes, com 31 registros, 2023 apresentou um aumento, com 57 ocorrências.

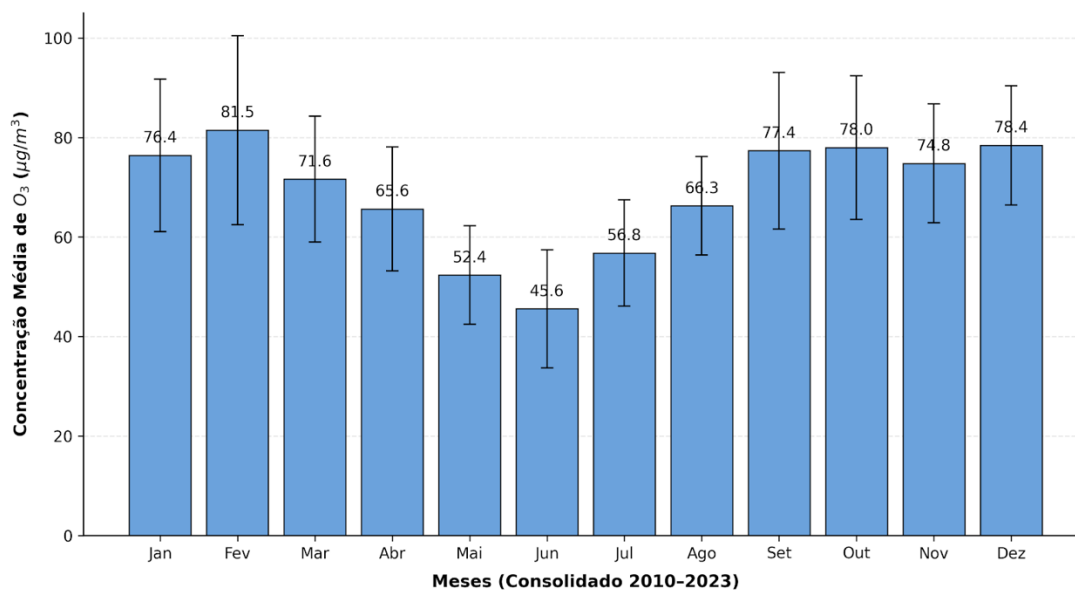
Em termos de sazonalidade, os meses de janeiro, fevereiro e março frequentemente registraram um número mais elevado de ocorrências de O₃ acima do limite, além de maiores valores médios e máximos. Fevereiro de 2012, por exemplo, marcou a maior média mensal e o maior pico instantâneo de O₃. O mês de dezembro também mostrou um número considerável de excedências em vários anos. Por outro lado, os meses do meio do ano, como junho e julho, geralmente apresentaram médias e máximos de O₃ mais baixos e menos ocorrências acima do limite (Figura 11).

Em síntese, a análise dos dados de O₃ revela uma dinâmica complexa na qualidade do ar, com os primeiros anos da série histórica sendo os mais críticos. Existem variações anuais e sazonais significativas, com picos de concentração e excedências mais frequentes nos meses de início e final de ano.

Tabela 9 – Valores médios mensais de Ozônio (O₃) segundo mês e ano. São Caetano do Sul, SP, 2010-2016.

Mês	Ano														
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Janeiro	77	87	83	45	93	101	60	70	73	99	64	73	73	72	1070
Fevereiro	97	110	127	69	85	72	77	86	66	73	53	73	79	74	1141
Março	80	75	93	54	54	59	58	61	82	72	71	86	75	83	1003
Abril	67	78	73	50	49	57	91	50	74	75	72	56	67	60	919
Mai	69	61	47	46	41	37	43	44	58	54	61	55	50	67	733
Junho	79	46	31	38	40	41	39	36	43	49	49	46	41	60	638
Julho	69	77	50	40	43	41	57	58	68	56	57	60	60	59	795
Agosto	87	83	60	57	63	71	65	59	57	57	64	72	58	75	928
Setembro	74	110	81	59	71	71	60	99	71	62	90	79	62	94	1083
Outubro	70	105	89	60	100	77	73	81	59	90	80	59	80	69	1092
Novembro	86	99	65	62	74	67	75	69	62	66	81	71	73	97	1047
Dezembro	86	97	80	66	71	75	83	73	99	76	68	65	64	95	1098
Total	941	1028	879	646	784	769	781	786	812	829	810	795	782	905	11547

Figura 11 – Valores médios mensais de Ozônio (O₃). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.



4.3 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E INTERNAÇÕES POR DOENÇAS RESPIRATÓRIAS CRÔNICAS EM SÃO CAETANO DO SUL

Este estudo explorou as correlações lineares entre os níveis de poluentes atmosféricos – Material Particulado 10 (MP₁₀), Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e Ozônio (O₃) – e a taxa de

internação por condições respiratórias – Asma, Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC) e o total de Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). A análise foi realizada tanto em uma base mensal quanto anual, utilizando o coeficiente de correlação para quantificar a força e a direção dessas relações.

4.3.1 Análise Descritiva e Testes de Normalidade

Para a caracterização do conjunto de dados, realizou-se uma análise descritiva associada aos testes de aderência à normalidade de Shapiro-Wilk (S-W) e Kolmogorov-Smirnov (K-S), com nível de significância (α) de 5%. A robustez do teste Shapiro-Wilk foi priorizada na interpretação de cenários de divergência, dado o tamanho moderado da amostra ($N \approx 168$) e sua maior sensibilidade a desvios estruturais.

Em relação ao O_3 e à Doença Respiratória Crônica, ambas as variáveis apresentaram aderência à distribuição normal. Para o Ozônio ($\bar{x} = 68,73$; $dp = 16,98$), os testes S-W ($p = 0,122$) e K-S ($p = 0,471$) foram consistentes em não rejeitar a hipótese nula (H_0) de normalidade. Comportamento semelhante foi observado na DRC ($\bar{x} = 10,52$; $dp = 4,96$), onde tanto o teste S-W ($p = 0,065$) quanto o K-S ($p = 0,616$) confirmaram a normalidade dos dados (Figuras 12 e 13).

Figura 12 – Q-Q Plot e Histograma do Ozônio (O_3). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

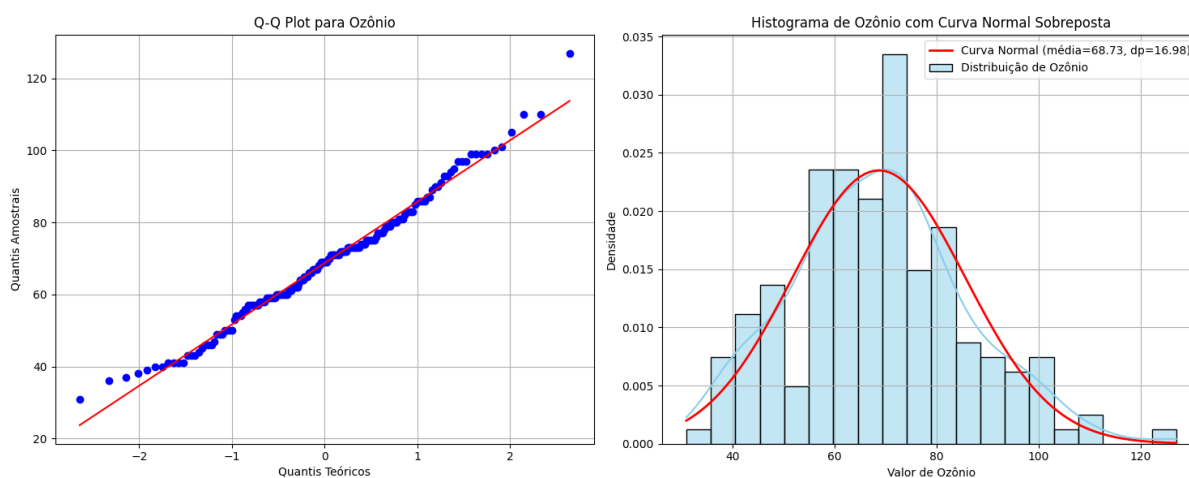
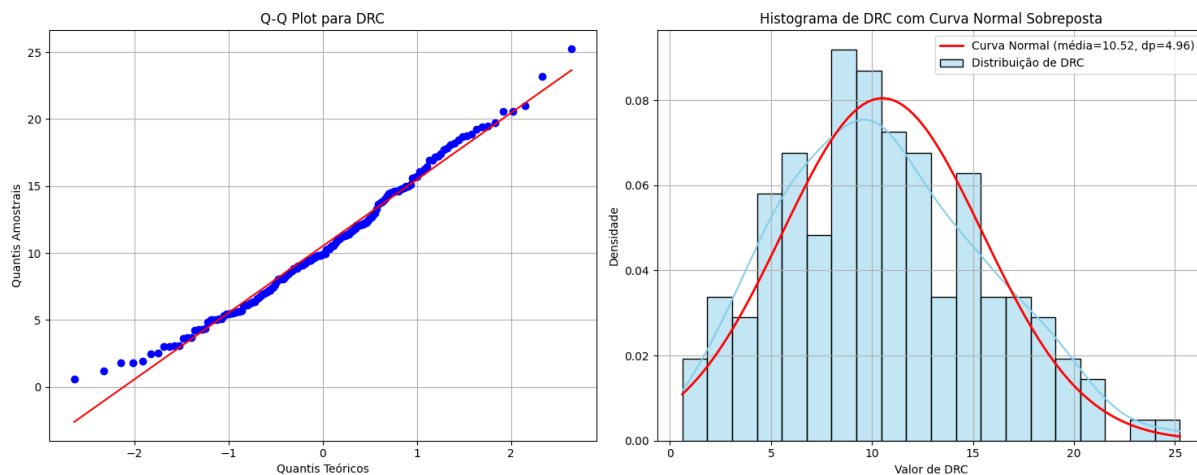


Figura 13 – Q-Q Plot e Histograma das taxas internações por Doença Respiratória Crônica (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.



Quanto ao MP_{10} , NO_2 e à asma, observou-se uma divergência clássica entre os testes. Para o MP_{10} ($\bar{x} = 32,38$; $dp = 9,77$), o teste de S-W rejeitou fortemente a normalidade ($p < 0,001$), enquanto o K-S não encontrou evidências para rejeição ($p = 0,071$). O mesmo padrão ocorreu no NO_2 ($p_{S-W} = 0,016$; $p_{K-S} = 0,795$) e nos casos de asma ($p_{S-W} < 0,001$; $p_{K-S} = 0,106$). Fundamentado na literatura estatística para amostras dessa magnitude, assumiu-se a não-normalidade dessas três distribuições, indicando que desvios nas caudas ou assimetrias locais comprometeram a aderência estrita à curva gaussiana (Figuras 14, 15 e 16).

Figura 14 – Q-Q Plot e Histograma do Material Particulado 10 (MP_{10}). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

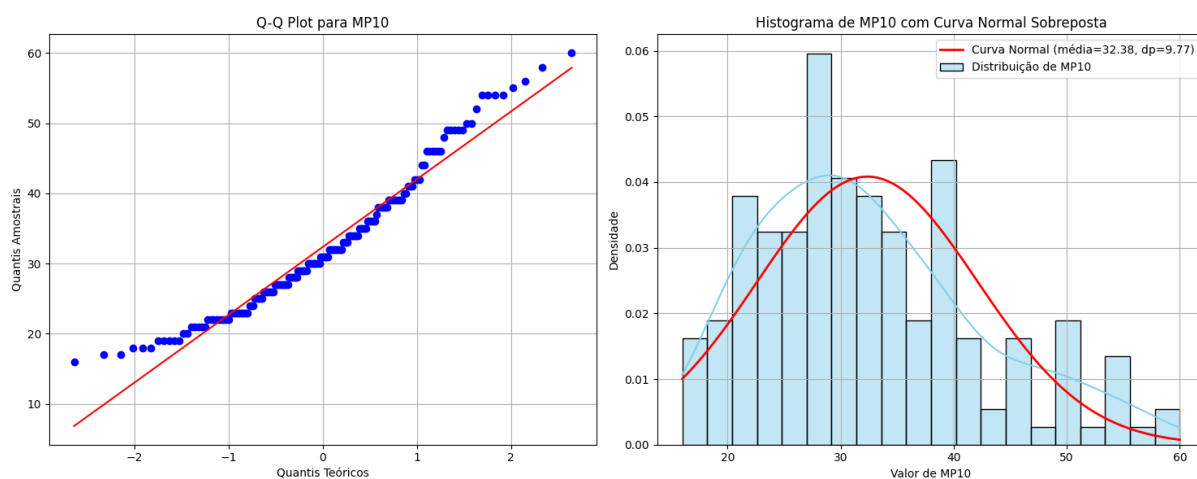


Figura 15 – Q-Q Plot e Histograma do Dióxido de Nitrogênio (NO₂). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

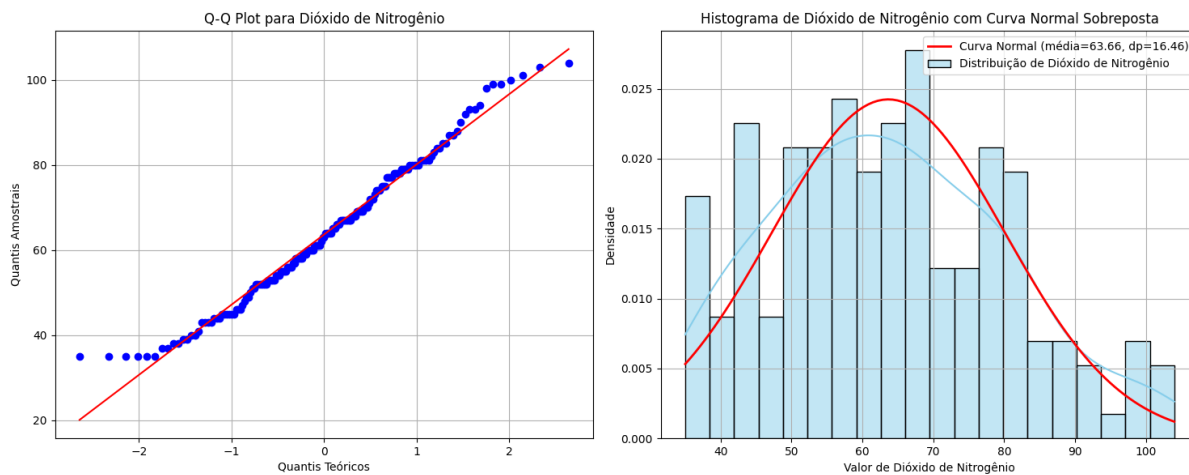
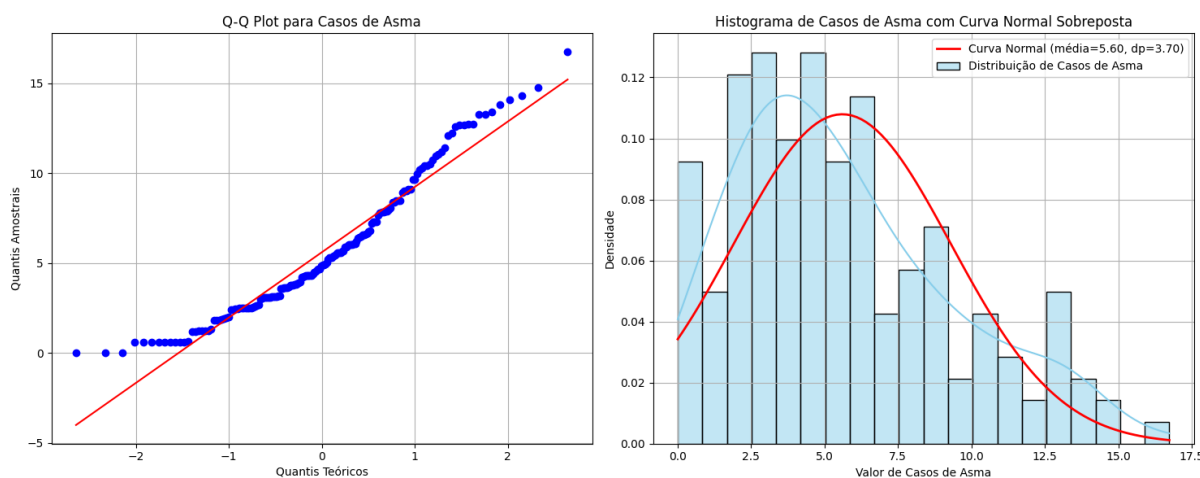


Figura 16 – Q-Q Plot e Histograma das taxas internações por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.



A exemplo das variáveis anteriores, a DPOC ($\bar{x} = 4,92$; $dp = 2,47$) também apresentou divergência, com o teste de Shapiro-Wilk apontando violação da normalidade ($p = 0,005$), resultado que prevalece para fins das análises subsequentes (Figura 17).

A Tabela 10 resume as estatísticas descritivas e os testes de normalidade dos poluentes ambientais e das doenças respiratórias crônicas analisadas.

Figura 17 – Q-Q Plot e Histograma das taxas internações por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010-2023.

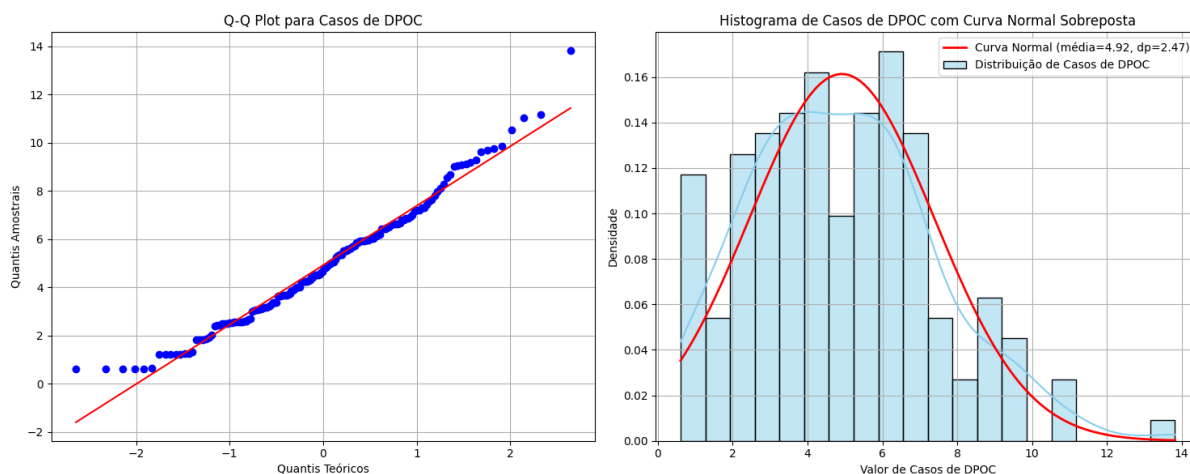


Tabela 10 – Estatística descritiva e testes de normalidade dos poluentes ambientais e doenças respiratórias crônicas. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

Variável	N	Média	DP	Mín.	Mediana	Máx.	p-valor (S-W)	p-valor (K-S)	Distribuição assumida
MP ₁₀	168	32,38	9,77	16,00	31,00	60,00	< 0,001	0,071	Não-Normal
NO ₂	167	63,66	16,46	35,00	63,00	104,00	0,016	0,795	Não-Normal
O ₃	168	68,73	16,98	31,00	69,00	127,00	0,122	0,471	Normal
Asma	168	5,60	3,70	0,00	4,88	16,74	< 0,001	0,106	Não-Normal
DPOC	168	4,92	2,47	0,61	4,73	13,82	0,005	0,811	Não-Normal
DRC	168	10,52	4,96	0,61	9,93	25,24	0,065	0,616	Normal

4.3.2 Correlação entre Taxas de Internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC) e Níveis de Material Particulado 10 (MP₁₀)

A relação entre internações por DRC e MP₁₀ apresentou variabilidade mensal. Observam-se correlações positivas moderadas em junho (0,64) e maio (0,51). Por outro lado, em setembro evidencia-se correlação negativa bem fraca (-0,17) entre as variáveis (Figura 18).

A análise da relação entre os níveis de MP₁₀ e as taxas de internação por DRC ao longo dos anos também demonstra uma dinâmica bastante variável, marcada pela alternância entre períodos de associação positiva e negativa. Nos anos de 2012, 2013 e 2014, observa-se uma correlação positiva moderada, sinalizando que o aumento do poluente esteve diretamente

associado ao incremento das taxas de internação por DRC. Esse mesmo comportamento positivo, embora de intensidade mais fraca, persistiu nos períodos de 2015, 2016, 2018 e 2019. Em contrapartida, o cenário se inverteu em outros momentos, revelando correlações negativas fracas em 2017, 2020 e 2023, anos em que o aumento do MP₁₀ coincidiu com a redução nos indicadores da doença (Figura 19).

Figura 18 – Correlação de *Spearman* mensal entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

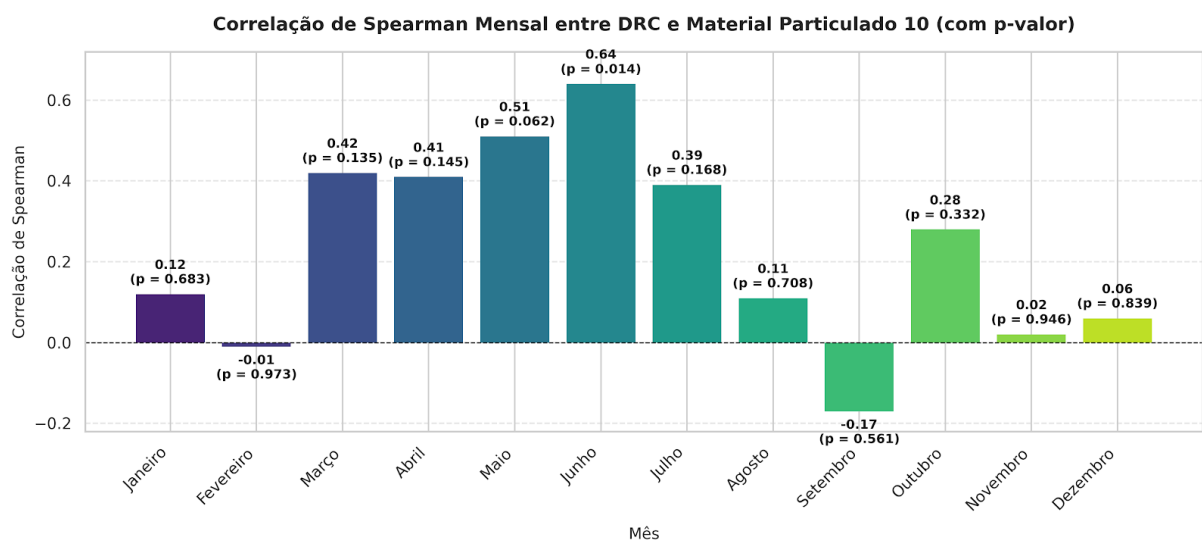
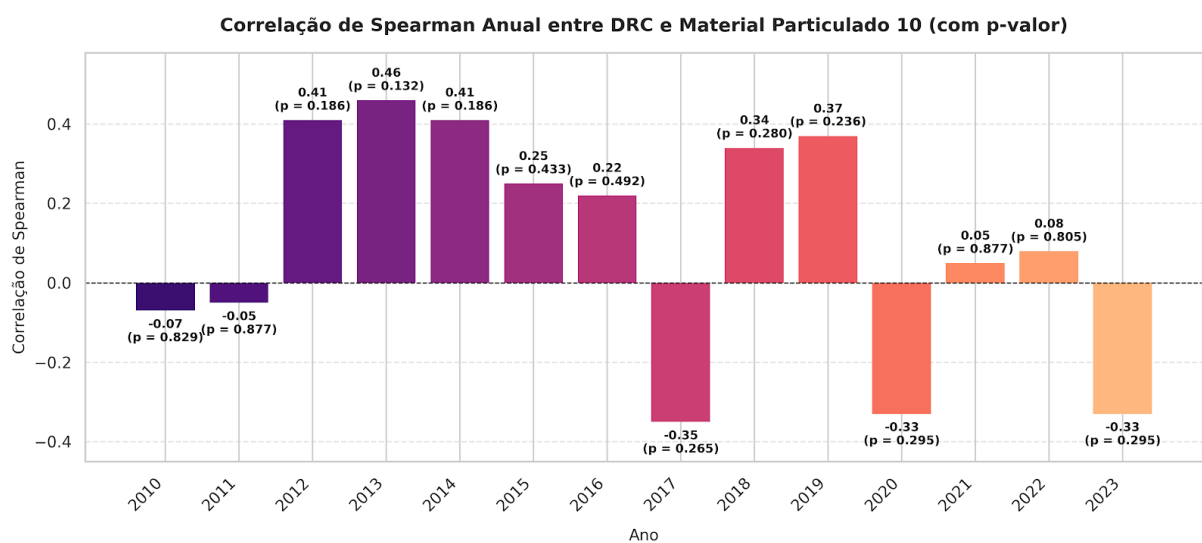


Figura 19 – Correlação de *Spearman* anual entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.



4.3.3 Correlação entre Taxas de Internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC) e Níveis de Dióxido de Nitrogênio (NO₂)

A correlação entre internações por DRC e NO₂ foi inconsistente mês a mês. As correlações positivas mais expressivas (moderadas) ocorreram em junho (0,65), março (0,57) e abril (0,51). Correlações negativas muito fracas foram observadas em novembro (-0,13) setembro (-0,04), e dezembro (-0,02) (Figura 20).

A análise da relação entre os níveis de NO₂ e as taxas de internação por DRC ao longo dos anos aponta também para uma dinâmica inconstante, caracterizada pela alternância entre resultados positivos e negativos. Uma tendência de associação positiva (fraca a moderada) foi observada nos anos de 2012, 2013, 2014, 2016, 2018, 2019 e 2021, indicando que, nesses períodos, o aumento do poluente esteve vinculado a um crescimento nos índices de internação pela doença, com destaque para o ano de 2014, que apresentou a associação mais expressiva. Por outro lado, o cenário se inverteu em diversos momentos, revelando correlações negativas entre muito fracas a moderadas em 2010, 2011, 2015 e 2017, intervalos nos quais o aumento do gás coincidiu com a redução nas taxas de internação por DRC (Figura 21).

Figura 20 – Correlação de *Spearman* mensal entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

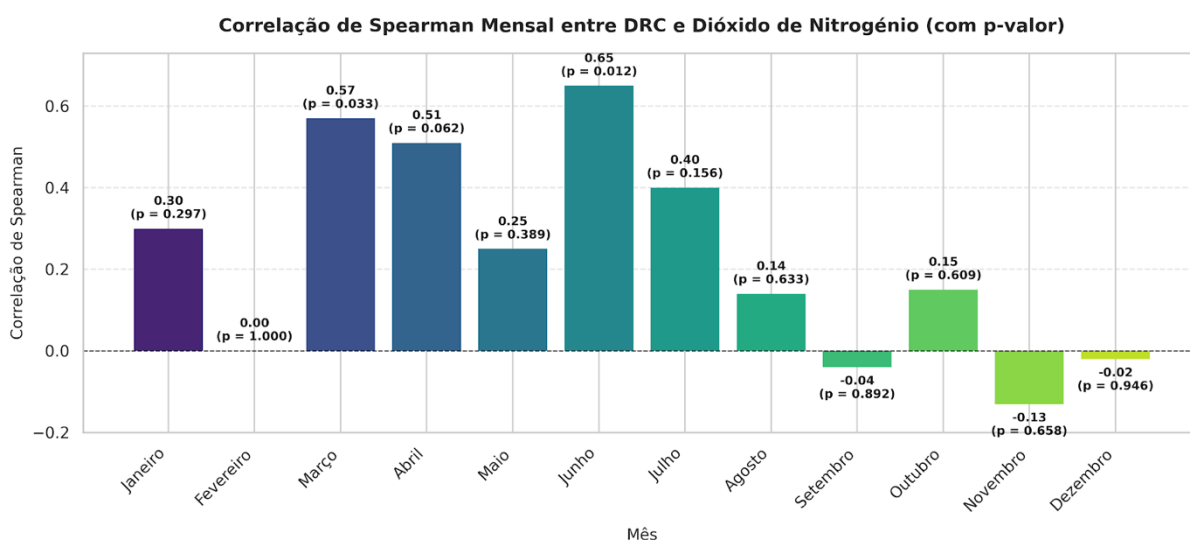
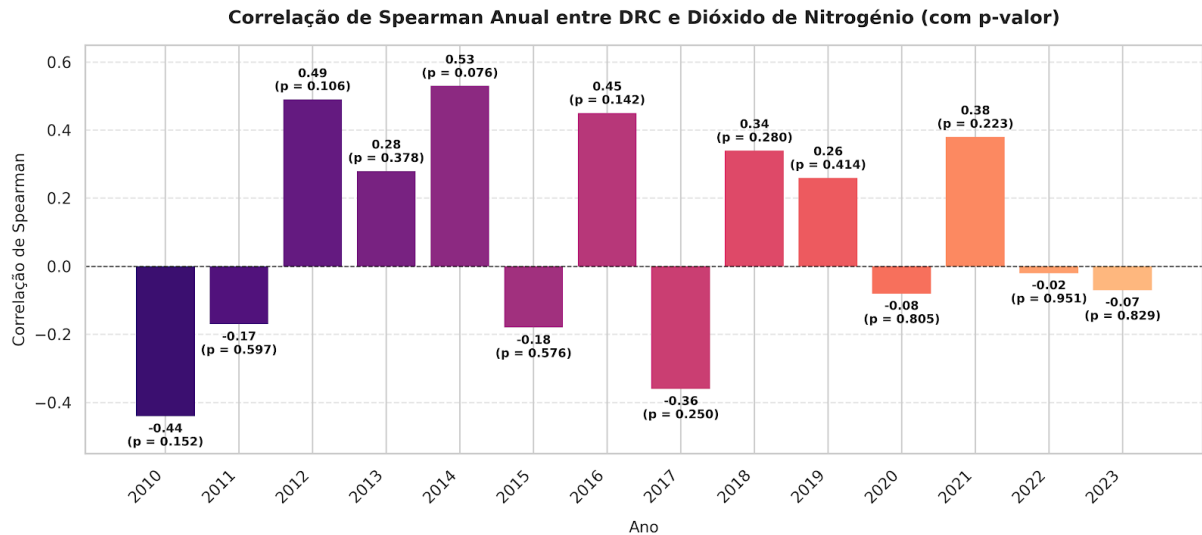


Figura 21 – Correlação de *Spearman* anual entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.



4.3.4 Correlação entre Taxas de Internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC) e Níveis de Ozônio (O₃)

A análise da relação entre os níveis de O₃ e as taxas de internação por DRC revela um padrão predominantemente inverso, embora marcado por algumas exceções temporais. A correlação mensal entre internações por DRC e O₃ foi amplamente fraca e frequentemente negativa. A única correlação positiva e muito fraca ocorreu em outubro (0,15). As correlações negativas mais significativas, ainda que fracas, ocorreram em novembro (-0,29) e fevereiro (-0,28) (Figura 22).

Essa tendência de que o aumento do O₃ geralmente não acompanha o avanço das internações por DRC foi confirmada na escala anual, magnitudes de correlação inversa moderada registradas em 2010, 2012, 2014, 2015 e 2019. No entanto, o ano de 2017 representou uma clara exceção ao apresentar uma correlação positiva moderada (0,47), destoando do comportamento histórico do restante do período (Figura 23).

Figura 22 – Correlação de *Pearson* mensal entre Ozônio (O_3) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

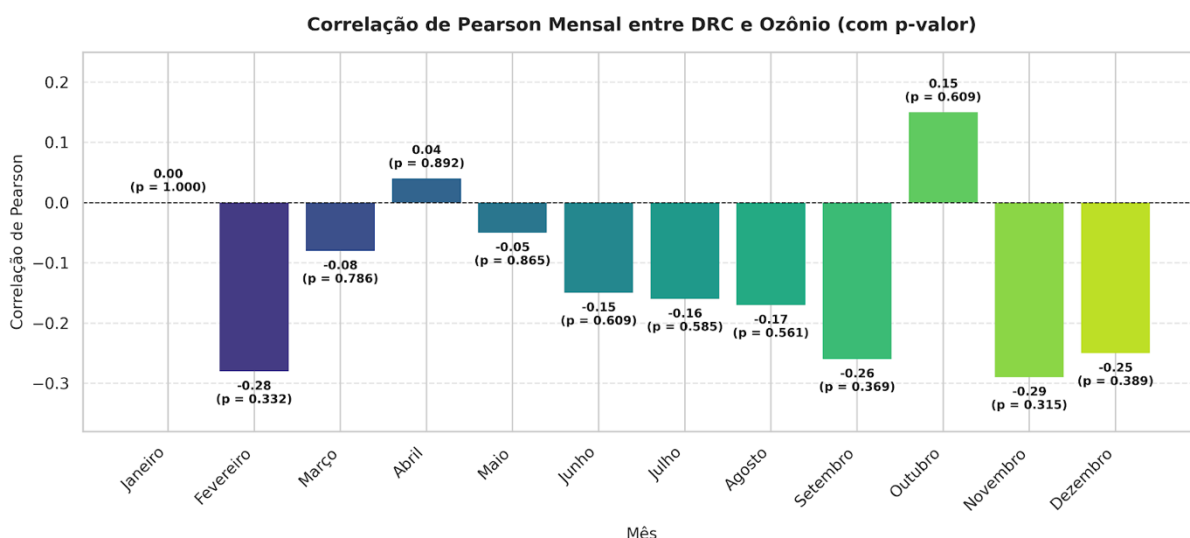
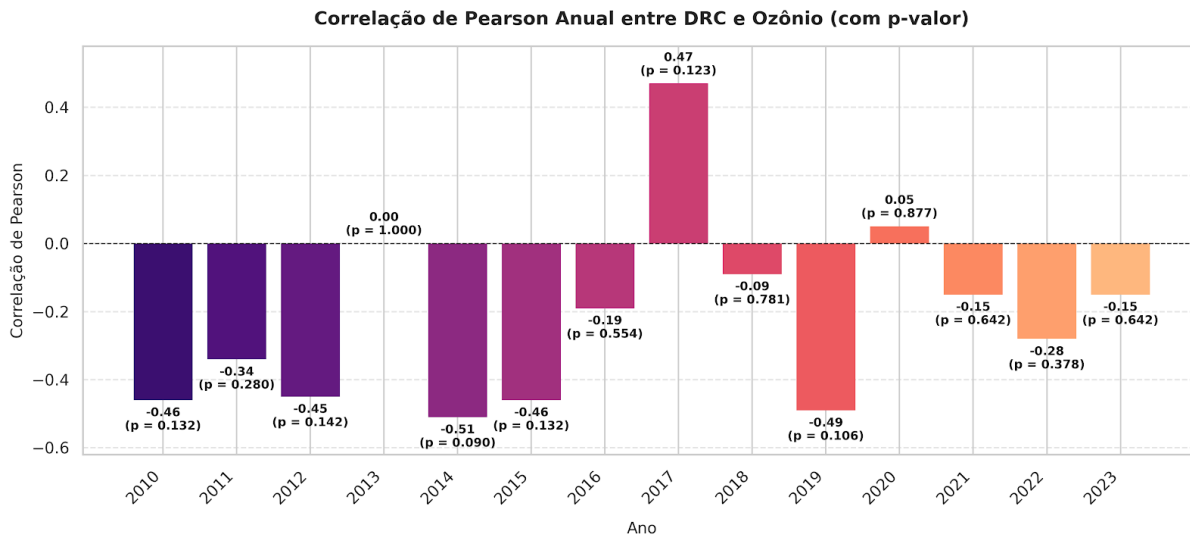


Figura 23 – Correlação de *Pearson* anual entre Ozônio (O_3) e taxa de internação por Doenças Respiratórias Crônicas (DRC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.



4.3.5 Correlação entre Taxas de Internação por Asma e Níveis de Material Particulado 10 (MP_{10})

A correlação mensal entre os níveis de MP_{10} e as internações por asma demonstrou variabilidade ao longo dos meses. Foram observadas correlações positivas fortes em junho (0,82) e janeiro (0,75). Em contraste, meses como setembro (-0,20) e fevereiro (-0,04) apresentaram correlações negativas muito fracas, indicando uma relação inversa. Outros meses

como março, abril, maio, julho e outubro mostraram correlações positivas moderadas (entre 0,43 e 0,53), enquanto novembro registrou uma correlação próxima de zero (Figura 24).

Em uma perspectiva anual, a correlação de *Spearman* entre as médias de MP₁₀ e as internações por asma variou significativamente ano a ano, oscilando entre -0,36 (correlação negativa fraca em 2020) e +0,37 (correlação positiva fraca em 2014), sugerindo que a relação entre essas duas variáveis mudou ao longo do tempo, e não foi consistentemente forte em nenhuma direção, seja positiva ou negativa (Figura 25).

Figura 24 – Correlação de *Spearman* mensal entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

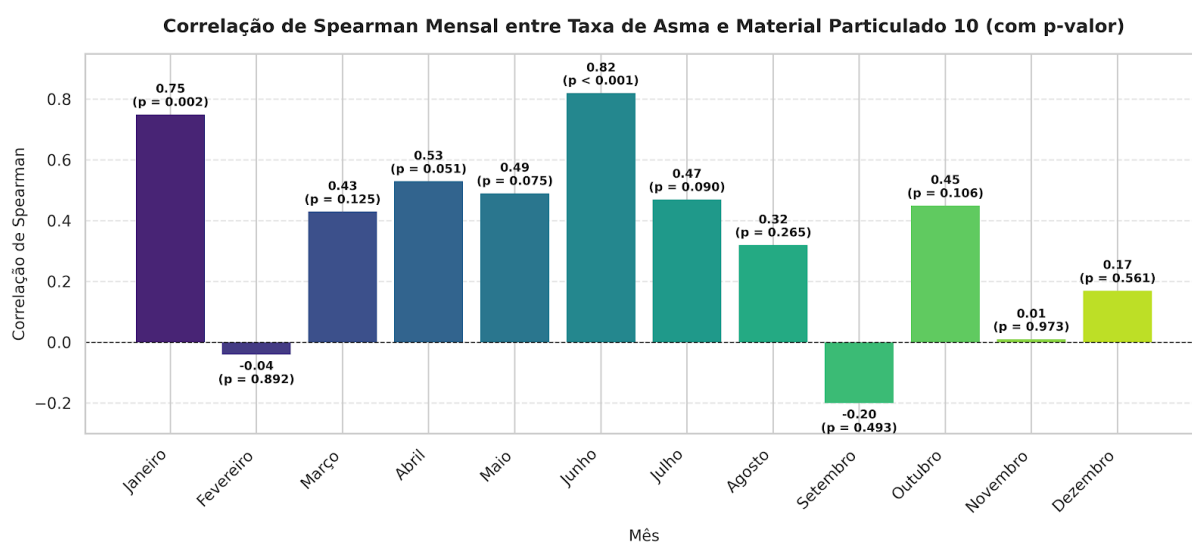
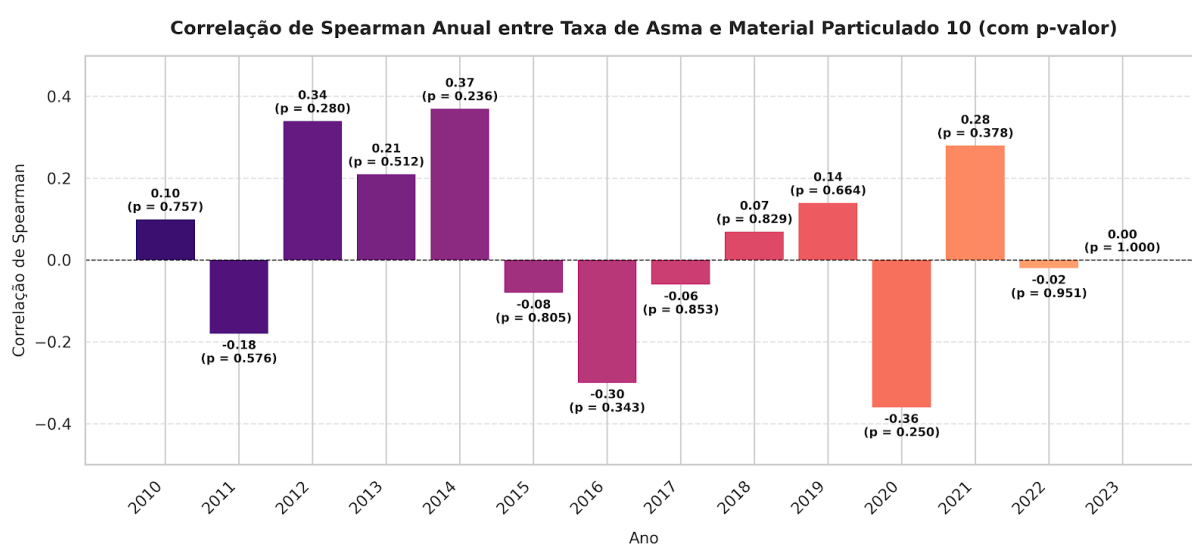


Figura 25 – Correlação de *Spearman* anual entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.



4.3.6 Correlação entre Taxas de Internação por Asma e Níveis de Dióxido de Nitrogênio (NO₂)

A correlação mensal entre internação por asma e NO₂ também variou significativamente. Os meses de abril (0,65), julho (0,61) e junho (0,58) exibiram correlações positivas moderadas, indicando uma associação mais direta entre o NO₂ e a taxa de internação por asma nesses períodos. Por outro lado, fevereiro (-0,01), setembro (-0,01) e novembro (-0,10) mostraram correlações negativas muito fracas, enquanto maio, agosto, outubro e dezembro apresentaram correlação de magnitude fraca (entre 0,18 e 0,37) (Figura 26).

A correlação entre a taxa de internações por asma e o NO₂ variou significativamente de ano para ano. Alguns anos mostram uma correlação positiva e outros, negativa ou próxima a zero, indicando pouca ou nenhuma relação linear. Por exemplo, em 2012 (0,45) e 2014 (0,43) e 2021 (0,42), houve correlação positiva moderada, enquanto em 2015 (-0,40) houve uma correlação negativa moderada. Em anos como 2018 (0,04), 2019 (-0,02) e 2020 (0,03) as correlações foram próximas de zero (Figura 27).

Essas flutuações anuais podem ser influenciadas por diversos fatores, como mudanças climáticas, políticas de saúde, variações na população ou outros poluentes que não foram considerados nesta análise.

Figura 26 – Correlação de *Spearman* mensal entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

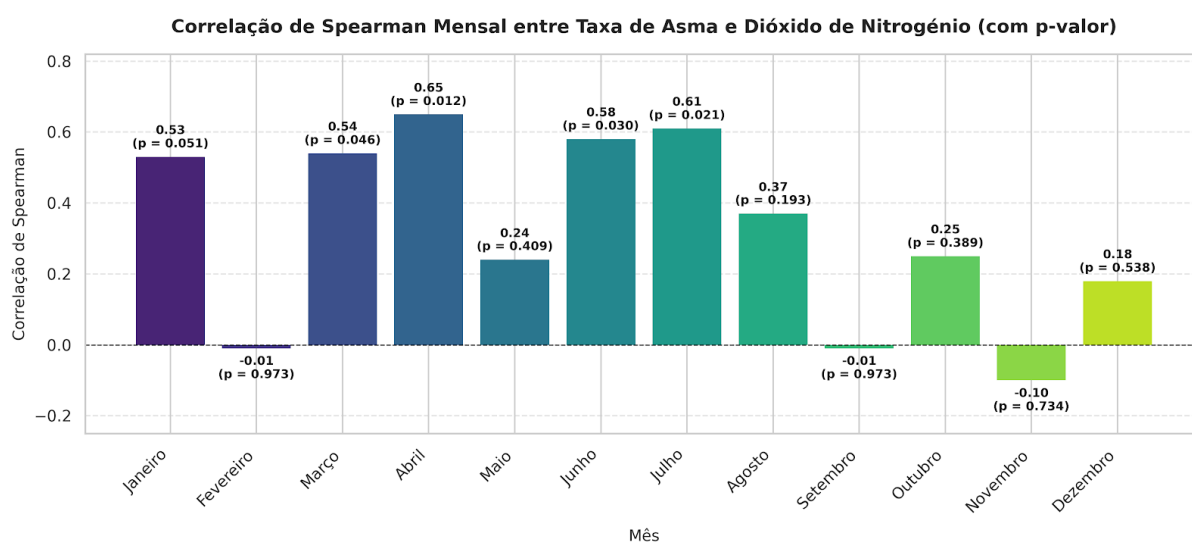
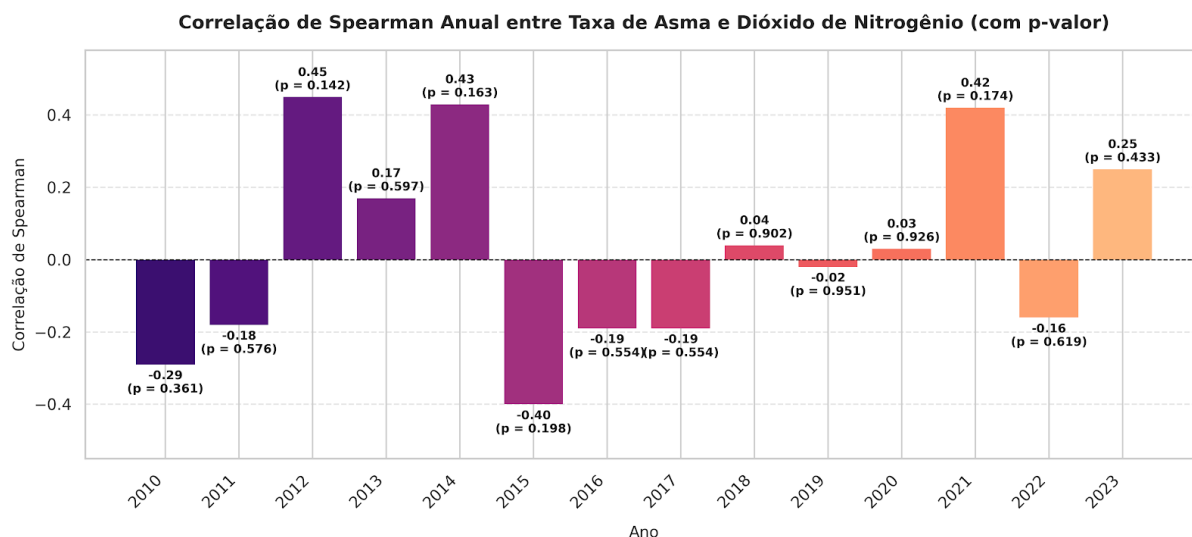


Figura 27 – Correlação de *Spearman* anual entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.



4.3.7 Correlação entre Taxas de Internação por Asma e Níveis de Ozônio (O₃)

A correlação mensal entre as internações por asma e O₃ mostrou-se predominantemente fraca e, em muitos meses, negativa. As correlações positivas mais altas, ainda que de magnitude fraca, ocorreram em janeiro (0,22), outubro (0,19) e abril (0,15). Meses como dezembro (-0,40) e fevereiro (-0,34) apresentaram as correlações negativas mais expressivas (Figura 28).

A análise anual da correlação entre as taxas de internações por asma e os níveis de O₃ denota que alguns anos apresentam correlação negativa, como 2014 (-0,53), 2010 (-0,51) e 2020 (-0,51), o que sugere que em anos com níveis mais altos de Ozônio, a taxa de internação por asma tendeu a ser mais baixa e vice-versa. Outros anos, como 2013 (0,29), 2017 (0,17) e 2018 (0,15), mostraram correlações positivas fracas ou muito fracas. Em outros anos, a correlação foi muito fraca ou próxima de zero, como em 2016 (-0,07) e 2021 (-0,01), indicando pouca ou nenhuma relação linear consistente entre as duas variáveis nesses períodos (Figura 29).

Figura 28 – Correlação de *Spearman* mensal entre Ozônio (O₃) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

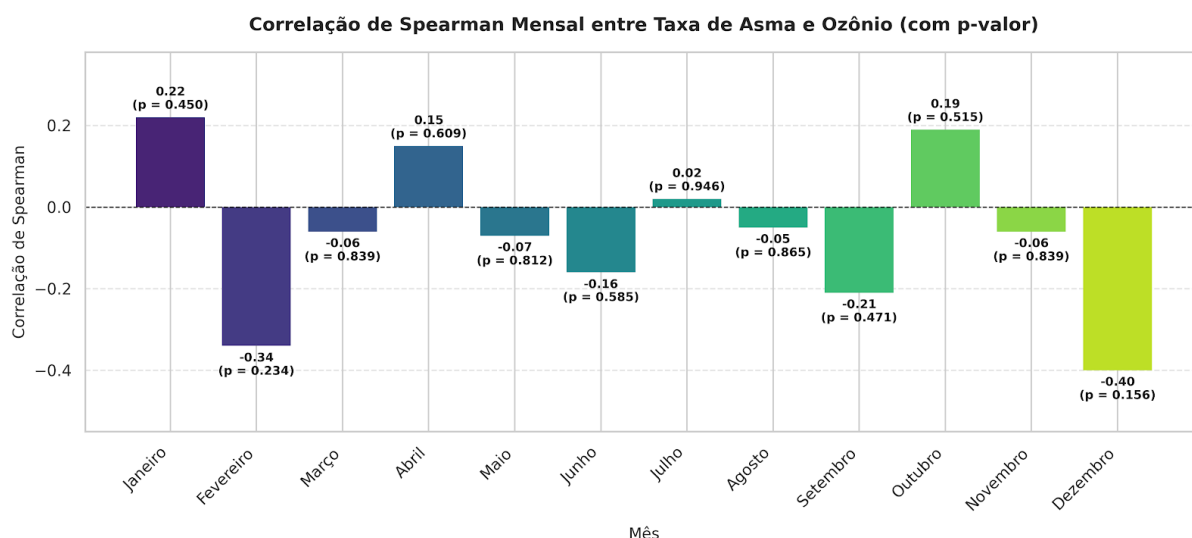
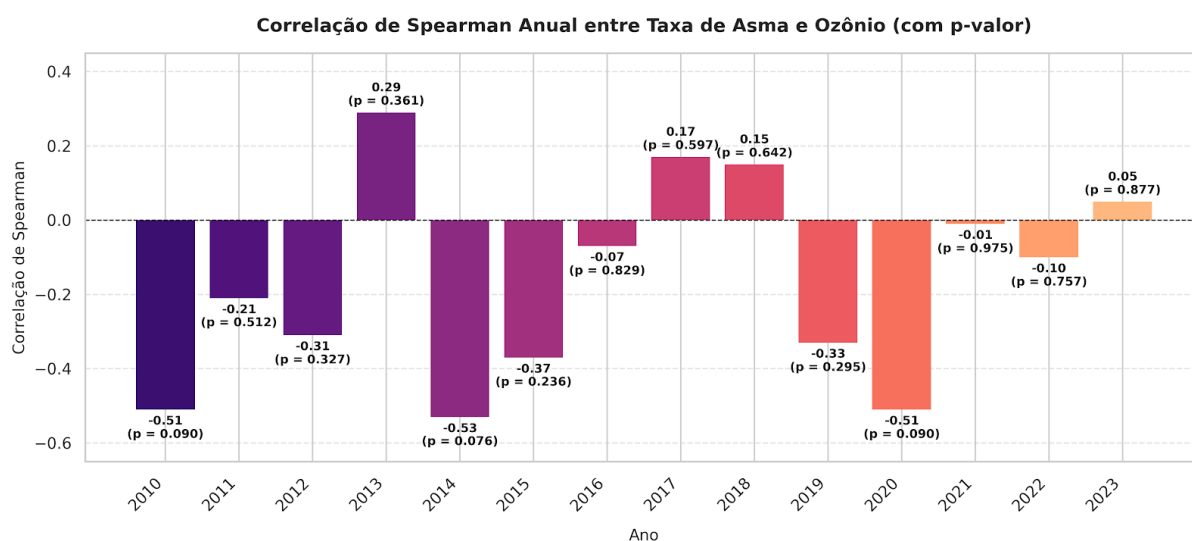


Figura 29 – Correlação de *Spearman* anual entre Ozônio (O₃) e taxa de internação por asma. São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.



4.3.8 Correlação entre Taxas de Internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC) e Níveis de Material Particulado 10 (MP₁₀)

A correlação entre internações por DPOC e MP₁₀ mostrou-se altamente inconsistente mensalmente, variando de positiva fraca (0,38) a negativa moderada (-0,47). As maiores correlações positivas, ainda que fracas, foram observadas em maio (0,38), junho (0,33) e abril (0,30). As correlações negativas mais expressivas (de moderadas a fracas) ocorreram em outubro (-0,47), janeiro (-0,27) e dezembro (-0,17) (Figura 30).

As correlações anuais positivas mais elevadas – de magnitude moderada (0,39 a 0,47) – foram observadas entre 2013-2015 e 2019, enquanto a correlação negativa mais expressiva – também moderada – ocorreu em 2023 (-0,52). Essas variações sugerem que a relação entre internação por DPOC e MP₁₀ não é constante e pode ser influenciada por outros fatores ou mudanças temporais (Figura 31).

Figura 30 – Correlação de *Spearman* mensal entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

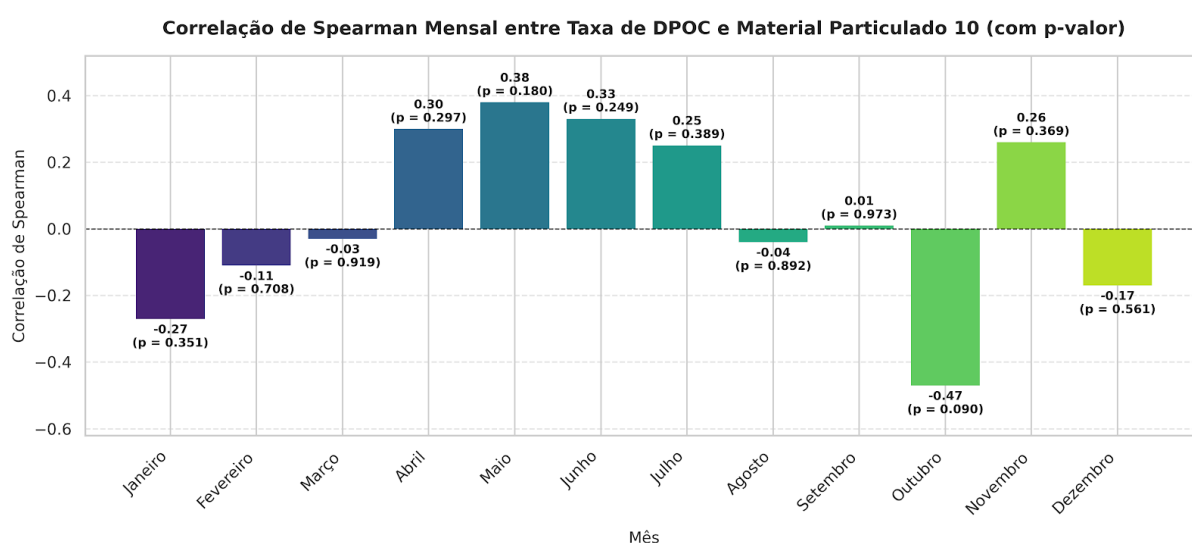
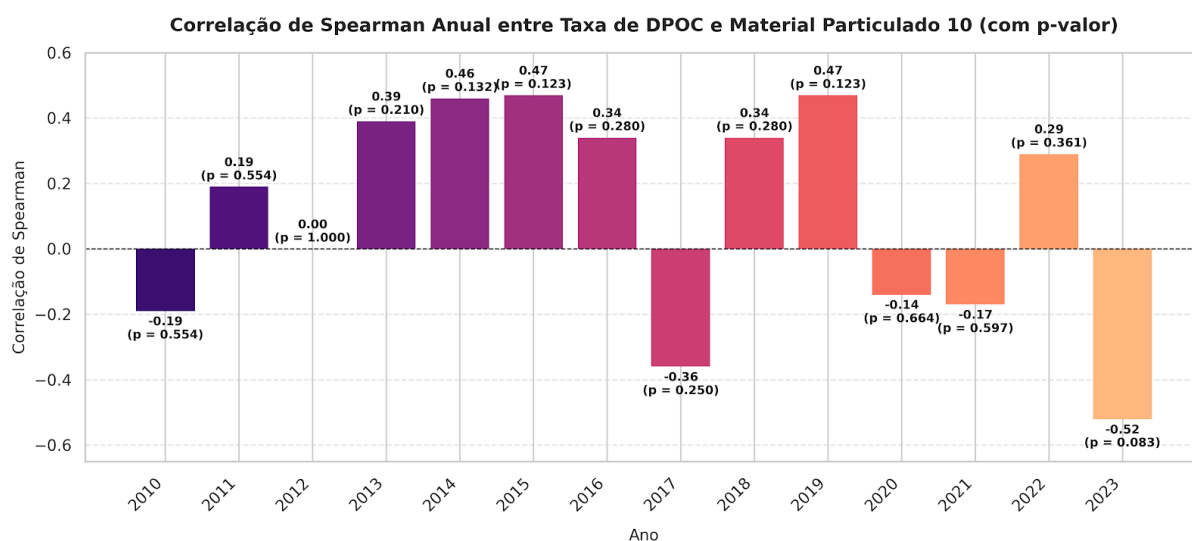


Figura 31 – Correlação de *Spearman* anual entre Material Particulado 10 (MP₁₀) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.



4.3.9 Correlação entre Taxa de Internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC) e Níveis de Dióxido de Nitrogênio (NO₂)

A correlação mensal entre internação por DPOC e níveis de NO₂ também foi bastante inconsistente. As maiores correlações positivas variaram de fracas a moderadas, sendo observadas em junho (0,55), abril (0,28) e março (0,25). Em contraste, outubro (-0,40) e dezembro (-0,22) apresentaram as correlações negativas mais notáveis, também de magnitude fraca a moderada (Figura 32).

A análise da relação entre os níveis de NO₂ e as taxas de internação por DPOC ao longo dos anos revela um cenário complexo e variável, indicando que esse poluente não atua de forma isolada. Em determinados períodos, como nos anos de 2014 (0,69), 2016 (0,57), 2019 (0,48) e 2022 (0,40), observou-se correlação positiva moderada, o que significa que o aumento do NO₂ esteve diretamente associado a um incremento nas internações por DPOC, tendência que também se repetiu, embora com magnitude mais fraca, em 2013 (0,18), 2018 (0,36) e 2021 (0,16). Por outro lado, houve anos de inversão nessa dinâmica, com correlações negativas fracas em 2017 (-0,33) e 2023 (-0,30), períodos nos quais o aumento do gás coincidiu com a diminuição das taxas de internação pela doença (Figura 33).

Figura 32 – Correlação de *Spearman* mensal entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

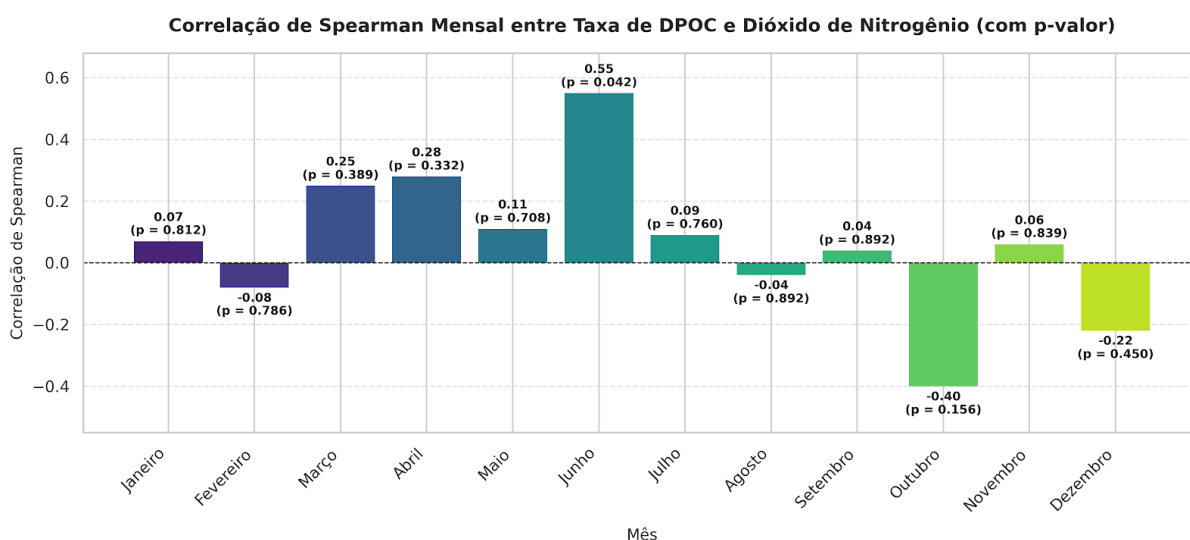
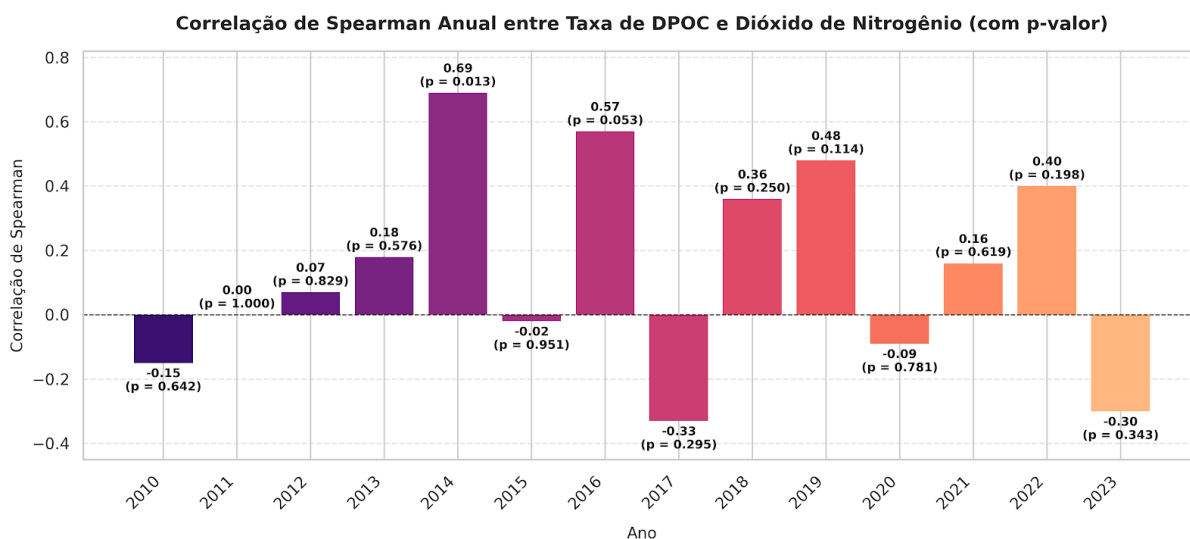


Figura 33 – Correlação de *Spearman* anual entre Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.



4.3.10 Correlação entre Taxa de Internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC) e Níveis de Ozônio (O₃)

A correlação entre as internações por DPOC e O₃ mensalmente foi geralmente fraca e negativa. As maiores correlações positivas – de magnitude fraca – ocorreram em março (0,18) e abril (0,10). As correlações negativas mais pronunciadas ocorreram em junho (-0,30) e novembro (-0,28) (Figura 34).

A análise da relação entre os níveis de O₃ e as taxas de DPOC ao longo dos anos também revela um padrão dinâmico e complexo, com variações significativas de direção e intensidade. Na maior parte do período, predominou uma associação inversa; em 2015 (-0,58), 2019 (-0,49), e 2013 (-0,47) registraram-se correlações negativas moderadas, indicando que o aumento do O₃ esteve associado a uma diminuição nas taxas de internação pela doença. Essa mesma tendência repetiu-se, porém, com menor intensidade, nos anos de 2011, 2012, 2014, 2018, 2021, 2022 e 2023 (entre -0,08 e -0,33). Em contrapartida, 2010, 2017 e 2020 apresentaram comportamento oposto, com correlações positivas de intensidade fraca a moderada, que apontam para o crescimento simultâneo de ambas as variáveis. Essa oscilação dos resultados ao longo do tempo reforça que a ligação entre o O₃ e as internações por DPOC não é homogênea (Figura 35).

Figura 34 – Correlação de *Spearman* mensal entre Ozônio (O_3) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.

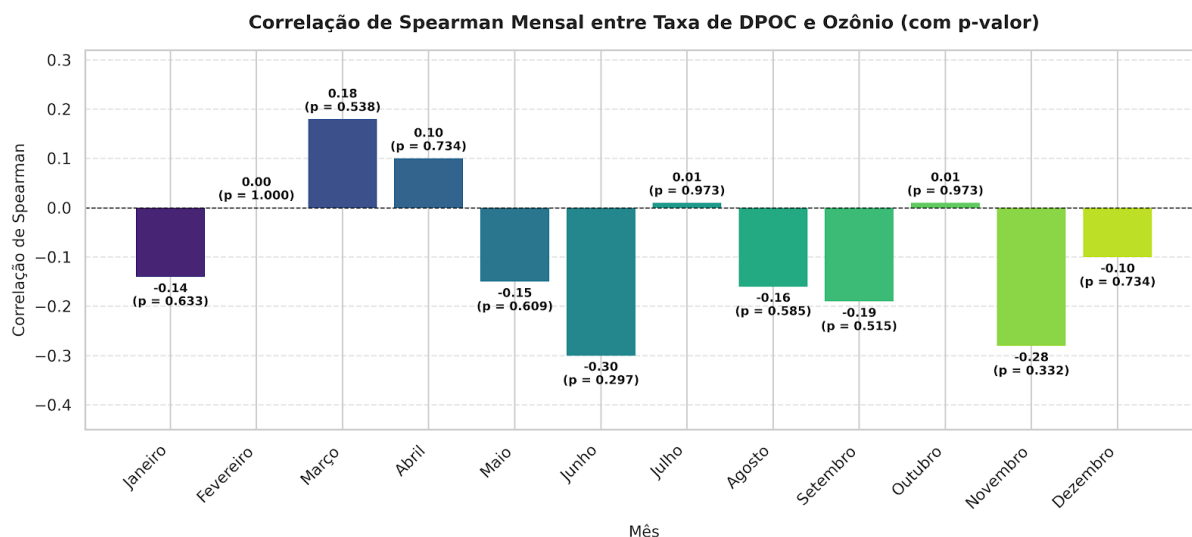
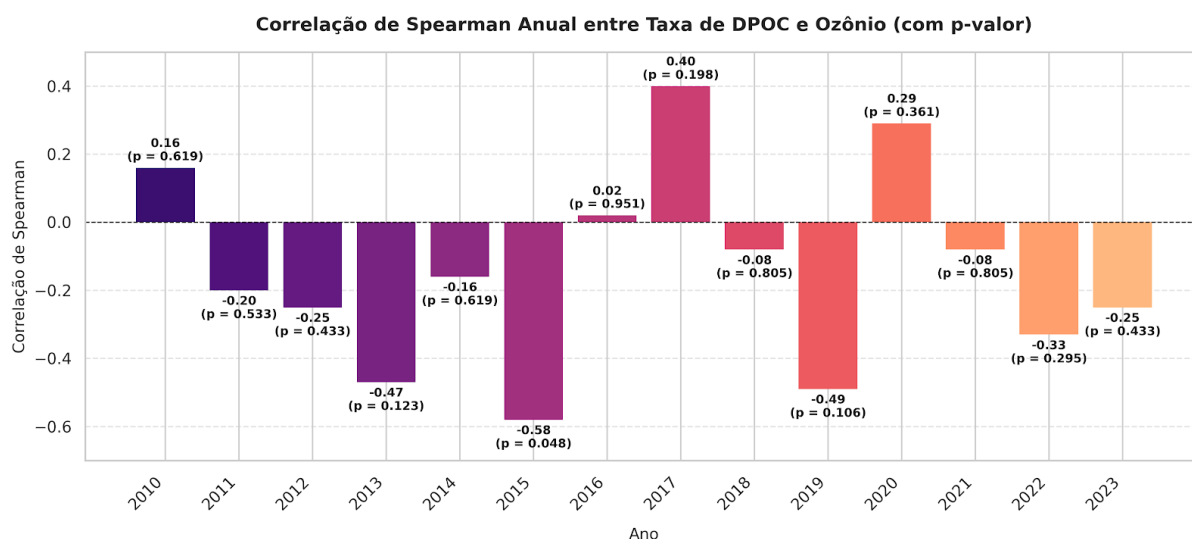


Figura 35 – Correlação de *Spearman* anual entre Ozônio (O_3) e taxa de internação por Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC). São Caetano do Sul, SP, 2010 a 2023.



4.4 AS CORRELAÇÕES LINEARES E SUAS APLICAÇÕES

Os resultados obtidos nesta investigação revelam um panorama dinâmico e de alta complexidade a respeito das interações entre a poluição atmosférica e complicações dos agravos à saúde respiratória no município de São Caetano do Sul ao longo do horizonte temporal de 2010 a 2023. A convergência entre os dados epidemiológicos locais obtidos via DATASUS, o

comportamento histórico dos poluentes monitorados pela CETESB e a literatura científica global permite fundamentar uma análise crítica sobre os impactos reais do modelo de urbanização e motorização na saúde pública.

4.4.1 A Dinâmica dos Poluentes Atmosféricos e a Saúde Respiratória a Longo Prazo: Mecanismos e Evidências

A análise em perspectiva anual evidenciou uma correlação positiva moderada entre a taxa de internação por asma e doenças respiratórias crônicas e os níveis de MP_{10} e NO_2 . Destacam-se os coeficientes de correlação mensais obtido entre as internações por asma e as concentrações médias de NO_2 . Esse achado corrobora diretamente o referencial teórico postulado, o qual identifica o NO_2 e o MP_{10} como subprodutos diretos dos processos de combustão interna veicular e da atividade industrial.

Do ponto de vista fisiopatológico, conforme apontado por Barnes (2016), a inalação crônica dessas partículas nocivas desencadeia uma robusta cascata inflamatória mediada por estresse oxidativo celular e desequilíbrio protease-antiprotease no parênquima pulmonar. O NO_2 atua de forma agressiva nas vias aéreas superiores e inferiores, exacerbando a hiperresponsividade brônquica e aumentando a suscetibilidade individual a alérgenos e patógenos biológicos.

Considerando que São Caetano do Sul possui uma densa malha viária e está inserido no coração da Região Metropolitana de São Paulo – uma região exposta ao reflexo do crescimento de quase 300% da frota veicular nacional nas últimas duas décadas (IBGE, 2026) – a correlação positiva entre poluentes e internações por doenças respiratórias ratifica o fardo biológico que a mobilidade urbana fóssil impõe à população local.

Esses dados alinham-se também aos grandes estudos de coorte internacionais apresentados no referencial teórico. O projeto multi-países Europeu ELAPSE (*Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe*) documentou associações longitudinais robustas entre a exposição continuada ao NO_2 e ao MP_{10} com o incremento na incidência de asma e DPOC. De maneira análoga, o estudo epidemiológico nacional de Holst et al. (2020), na Dinamarca, comprovou que mesmo incrementos marginais ($5 \mu g/m^3$) na exposição a partículas finas elevam o risco de asma e chiado persistente na infância.

A replicação desse padrão estatístico em São Caetano do Sul demonstra que, independentemente da escala territorial, a exposição continuada a poluentes gerados pelo

tráfego atua como um determinante proximal para a exacerbação e consolidação de quadros inflamatórios respiratórios crônicos.

4.4.2 A Volatilidade Mensal e o Papel Modulador das Variáveis Microclimáticas

A análise fundamentada em séries temporais mensais revelou uma volatilidade acentuada, caracterizada por coeficientes de correlação inconsistentes e flutuações sazonais.

Conforme apontado pela CETESB (2023), fenômenos climáticos típicos do inverno do Sudeste brasileiro, como a estabilidade atmosférica e a inversão térmica, reduzem drasticamente a camada de mistura da atmosfera. Durante esses episódios, os poluentes emitidos pela frota viária ficam retidos próximos à superfície horizontal, elevando as concentrações locais a patamares críticos, sem que ocorra necessariamente uma alteração no volume absoluto de emissões do tráfego municipal.

Adicionalmente, as partículas de MP_{10} exibem um comportamento físico altamente dependente dos regimes de vento e precipitação. Enquanto ventos fortes favorecem o transporte e a diluição transfronteiriça dos poluentes, amenizando temporariamente os riscos em SCS, períodos de estiagem prolongada favorecem a ressuspensão da poeira do solo e mantêm o material particulado fino em suspensão por períodos prolongados.

Portanto, os picos mensais de internação por asma e DRC observados na série histórica não derivam exclusivamente de flutuações na atividade econômica ou veicular, mas sim de uma dinâmica não-linear complexa, onde o clima regional determina o nível de exposição e de toxicidade real a que a população é submetida.

4.4.3 O Paradoxo do Ozônio (O_3): Efeito de Titulação e Interações Não Lineares

Um dos resultados estatísticos mais provocativos e contraintuitivos deste estudo foi a correlação persistentemente fraca e predominantemente negativa identificada entre os casos de asma/DRC e os níveis de O_3 , tanto no agregado mensal quanto no anual. De acordo com as diretrizes da EPA (2025), o ozônio troposférico é classificado como um potente oxidante biológico capaz de induzir inflamação aguda nas vias aéreas e reduzir a capacidade pulmonar, especialmente em indivíduos asmáticos. No entanto, o comportamento estatístico negativo e assistemático observado em SCS replica perfeitamente o paradoxo reportado no projeto Europeu ELAPSE, que também acusou associações negativas isoladas para o O_3 (Brunekreef *et al.* 2021)

Esse fenômeno não anula a toxicidade do ozônio, mas expõe a complexidade da química atmosférica em ambientes densamente urbanizados. O O_3 é um poluente secundário, cuja síntese fotoquímica na troposfera depende diretamente da incidência de radiação solar, temperaturas elevadas e da razão quantitativa entre compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio (NO_x) (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [EPA], 2025). Em centros urbanos saturados por emissões primárias veiculares, como o município estudado, ocorre o processo químico conhecido como titulação do ozônio. O Óxido Nítrico (NO) recém-emitido pelos escapamentos dos veículos reage quase instantaneamente com o ozônio ambiente, destruindo-o para formar NO_2 .

Como consequência, as áreas de tráfego mais intenso e congestionado, onde o risco respiratório é maior devido ao material particulado, frequentemente registram as menores concentrações de O_3 . A análise isolada de correlação linear simples mostra-se, portanto, insuficiente para capturar o real impacto do ozônio, evidenciando que sua atuação sobre a saúde ocorre através de efeitos não-lineares, interações sinérgicas multipoluentes e potenciais efeitos de *lag* (atraso temporal entre a exposição fotoquímica e o desfecho clínico).

4.4.4 O Experimento Natural de 2020: Consequências do Distanciamento Social na Saúde Respiratória

A expressiva retração nos registros epidemiológicos de internações por Doenças Respiratórias Crônicas consolidadas no ano de 2020, que atingiu o piso histórico de apenas 79 internações frente ao pico de 260 ocorrências em 2013, constitui um ponto central para a discussão. Conforme antecipado pela literatura epidemiológica global recente, a eclosão da pandemia de COVID-19 e a consequente imposição de *lockdowns*, teletrabalho e restrições de mobilidade configuraram um “experimento natural” sem precedentes na história da gestão urbana (Flórida, 2021)

Essa redução abrupta de casos de DRC decorreu de dois mecanismos sinérgicos. Primeiramente, o confinamento domiciliar e o uso compulsório de máscaras de proteção facial mitigaram drasticamente a circulação comunitária de vírus respiratórios sazonais (como Influenza e Rinovírus), os quais são os principais gatilhos biológicos para as exacerbações agudas de pacientes com DPOC e asma (JACKSON & GERN, 2022). Em segundo lugar, a desaceleração econômica local e a redução substancial do fluxo de veículos nas principais vias arteriais de São Caetano do Sul geraram uma queda imediata nas emissões primárias de NO_2 e fuligem no nível do solo.

Esse cenário atípico de 2020 atua como uma prova de conceito empírica para esta dissertação: ele demonstra que intervenções estruturais na mobilidade urbana e a redução da exposição humana direta aos poluentes atmosféricos resultam em um alívio epidemiológico imediato e mensurável sobre o sistema de saúde.

4.4.5 Interfaces com Cidades Inteligentes, Gestão Hospitalar e o Custo para o Sistema Único de Saúde

A relevância deste estudo ganha contornos práticos ao associar a prevalência de gênero e o perfil etário encontrados nos dados de SCS com o manejo clínico hospitalar. Os dados apontam uma distribuição de DRC com ligeira predominância masculina (53,44%), porém, com uma distribuição próxima à paridade em relação à DPOC, concentrando-se massivamente na população idosa acima de 60 anos. Na literatura médica, como apontado por Smith & Wrobel (2014), mais de 80% desses pacientes apresentam comorbidades graves associadas, tais como insuficiência cardíaca crônica, diabetes mellitus e distúrbios de ansiedade.

A exposição contínua ao MP_{10} e NO_2 em ambiente urbano atua desestabilizando não apenas o pulmão, mas o sistema cardiovascular sistêmico desses idosos, desencadeando internações complexas e de alto custo. Em escala nacional, os custos diretos da DPOC para o SUS já superam R\$ 103 milhões anuais (Dino, 2026). Para um município de elevada densidade demográfica e populacional idosa como São Caetano do Sul, a cronicidade dessas doenças impõe uma pressão orçamentária severa e constante sobre a rede secundária e terciária de saúde.

Diante disso, o paradigma de Cidades Inteligentes e Sustentáveis deixa de ser um conceito puramente tecnológico e passa a ser uma necessidade de sobrevivência fiscal e sanitária. A constatação de que as médias anuais mascaram volatilidades sazonais agudas comprova que a governança ambiental do município não pode operar de forma analógica ou reativa.

A incorporação de redes de sensores baseadas em *Internet* das Coisas (IoT) para monitoramento em tempo real da qualidade do ar, associada a algoritmos preditivos acoplados a aplicativos móveis de saúde digital, permitiria emitir alertas antecipados para que a população idosa e vulnerável evitasse a exposição em vias saturadas durante picos de poluição. Conforme demonstrado no projeto piloto de Barcelona, essa abordagem inteligente possui o potencial de reduzir em até 65% a exposição pessoal a poluentes, mitigando o gatilho das exacerbações e contendo as taxas de hospitalização e custos no ecossistema de saúde municipal (CASTELL *et al.*, 2017).

4.4.6 Alinhamento com a Agenda Internacional: Normas ISO e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Por fim, os achados empíricos desta pesquisa oferecem sustentação científica para subsidiar as políticas públicas do município de São Caetano do Sul no cumprimento das agendas internacionais de sustentabilidade. As evidências de associação entre os poluentes atmosféricos e os “surto” de internações respiratórias fornecem indicadores objetivos e métricas locais para a aplicação prática da Norma ISO 37120 (Indicadores para Cidades Sustentáveis).

A estruturação de uma infraestrutura urbana inteligente orientada para a qualidade do ar permite ao gestor municipal parametrizar e mensurar o avanço da cidade em direção às metas de sustentabilidade global. De forma direta, a mitigação e o monitoramento dinâmico dos poluentes em SCS atendem a três pilares da Agenda 2030 da ONU: ODS 3 (Saúde e Bem-Estar): especificamente focado na redução da morbimortalidade por doenças crônicas não transmissíveis induzidas por contaminação ambiental e atmosférica; ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis): sobretudo em relação à Meta 11.6, que exige a redução do impacto ambiental negativo *per capita* das cidades, dedicando atenção especial à gestão da qualidade do ar; e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima): por meio do estímulo a estratégias de mobilidade ativa, expansão de espaços verdes urbanos e implementação de corredores de ventilação (UNITED NATIONS [UN], 2015). Tais estratégias diminuem tanto as emissões de poluentes locais de curto prazo (como o NO₂) quanto os gases de efeito estufa globais, reduzindo a formação secundária do ozônio troposférico impulsionada pelo aquecimento global.

Ao correlacionar e cruzar as bases do DATASUS e da CETESB sob a ótica das Cidades Inteligentes, esta pesquisa conclui que a sustentabilidade urbana em São Caetano do Sul depende da transição para um modelo de governança baseada em dados. Tecnologias de baixo carbono e o planejamento urbano centrado no ser humano emergem como ferramentas indispensáveis para dissociar o desenvolvimento socioeconômico do município do impacto nas doenças respiratórias crônicas.

4.4.7 Considerações Finais sobre as Análises de Correlação Linear

Os resultados desta pesquisa revelam um cenário complexo de interação entre a poluição do ar e internações por doenças respiratórias crônicas em São Caetano do Sul. Em uma

perspectiva anual, observa-se uma correlação positiva moderada entre as internações por asma e DRC e os níveis de MP_{10} e NO_2 . Esses achados sugerem que, a longo prazo, anos com maiores concentrações desses poluentes tendem a coincidir com um aumento nos casos de asma e DRC, indicando a importância de políticas de controle da qualidade do ar como componentes essenciais de cidades inteligentes e saudáveis.

Em contraste com as relações anuais de MP_{10} e NO_2 , o O_3 apresentou correlações anuais muito fracas ou insignificantes com as internações por todas as doenças respiratórias analisadas (asma, DPOC e total de DRC). Isso sugere que o O_3 , isoladamente e em uma análise linear simples, não representa o principal motor da internação por essas doenças nesse contexto, ou que sua influência é mais mediada ou não-linear. A análise mensal para todos os poluentes e condições respiratórias crônicas demonstrou uma variabilidade considerável, com meses apresentando correlações positivas fortes e outros com correlações fracas ou até negativas. Essa inconsistência mensal é um indicativo importante da influência de fatores sazonais adicionais, como variáveis climáticas (temperatura, umidade), padrões de atividade humana, ou a presença de outros poluentes e alérgenos, que modulam as interações em curtos períodos (Oliveira, 2011).

A volatilidade das correlações mensais e anuais sublinha que, embora MP_{10} e NO_2 pareçam ter um impacto cumulativo e de longo prazo na saúde respiratória em contextos urbanos, a dinâmica a curto prazo é significativamente mais complexa, como evidenciado pela divergência de correlações encontradas. Esta observação é vital para o planejamento em cidades inteligentes, pois sugere que a gestão da qualidade do ar não pode se basear apenas em médias anuais, mas precisa considerar as flutuações sazonais e seus moduladores. Para aprofundar a compreensão, é imperativo que futuras pesquisas explorem efeitos de atraso (*lag*), análises multipoluentes para entender as interações sinérgicas entre os poluentes, e a inclusão de um leque mais amplo de covariáveis ambientais e socioeconômicas. Tais abordagens permitirão o desenvolvimento de estratégias de intervenção mais precisas e adaptativas para promover a saúde respiratória em ambientes urbanos sustentáveis.

4.5 A FALHA DAS CORRELAÇÕES LINEARES E A BUSCA PELOS EFEITOS TEMPORAIS

4.5.1 Análises dos Efeitos de Atraso (*lag*)

Para analisar a associação entre poluentes ambientais e eventos de saúde, a econometria e a estatística médica frequentemente recorrem ao Teste de Causalidade de Granger. Esse teste busca responder se os valores passados e presentes de uma variável preditora (ex.: concentração de MP_{10} ou NO_2) ajudam a prever os valores futuros de outra variável resposta (ex.: internações por doenças respiratórias), superando a simples análise de correlação (*Pearson* ou *Spearman*) (CARNEIRO, 1997). Vale ressaltar que o teste de Granger fornece evidência de que o passado de uma série auxilia na previsão da outra, o que não equivale a uma interpretação de causalidade estrutural ou verdadeira.

4.5.2 Interpretação dos Gráficos de p-valores do Teste de Causalidade de Granger

Nos gráficos apresentados a seguir, cada barra mostra o resultado (p-valor) para um tempo de atraso (defasagem, em meses) diferente, e a linha vermelha marca o limite de tolerância padrão de 0,05.

A lógica de leitura é simples: a barra abaixo da linha vermelha ($p < 0.05$) indica que existe associação, ou seja, o resultado é estatisticamente significativo, o que significa que o passado de uma variável realmente ajuda a prever a outra nessa defasagem. Se a barra estiver acima da linha vermelha ($p > 0.05$), não há provas estatísticas suficientes para afirmar que uma variável influencia a outra nessa defasagem específica.

4.5.3 Teste de Causalidade de Granger entre Ozônio e internações por DRC (Ozônio causa Granger DRC) e entre internações por DRC e Ozônio (DRC causa Granger Ozônio)

Partimos das hipóteses nulas “Ozônio não causa Granger DRC” e “DRC não causa Granger Ozônio”, chegando nos achados ilustrados na Figura 36.

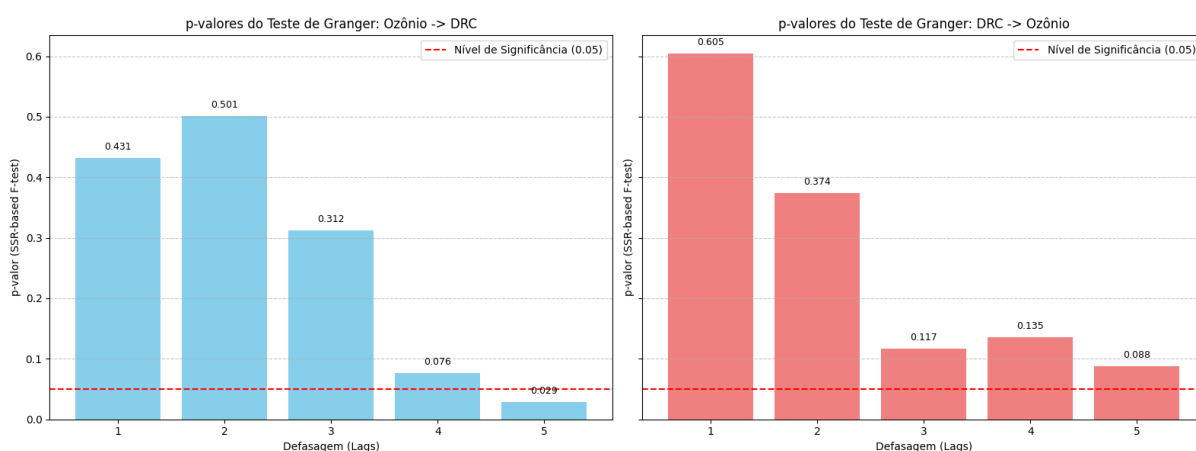
Na direção de Ozônio para DRC, nas defasagens de 1, 2, 3 e 4 meses, os p-valores (0,431; 0,501; 0,312 e 0,076, respectivamente) são maiores que 0,05. Isso significa que, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto,

não podemos concluir que o “Ozônio causa Granger na DRC”. Já para uma defasagem de 5 meses, o p-valor é 0,029, o que sugere que, com uma defasagem de 5 meses, os valores passados de Ozônio fornecem informações significativas para prever os valores futuros de DRC, indicando que o “Ozônio causa Granger na DRC” nessa defasagem.

Na direção de DRC para Ozônio, em todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p-valores (0,605; 0,374; 0,117; 0,135 e 0,088, respectivamente) são maiores que 0,05. Isso significa que, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que a “DRC causa Granger no Ozônio” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Em resumo, os resultados sugerem que as concentrações de Ozônio podem ter um efeito preditivo sobre as concentrações de DRC com um atraso de 5 meses, mas o inverso não foi observado para as defasagens analisadas.

Figura 36 – Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre Ozônio e interações por DRC.



4.5.4 Teste de Causalidade de Granger entre Dióxido de Nitrogênio e interações por DRC (NO₂ causa Granger DRC) e entre interações por DRC e Dióxido de Nitrogênio (DRC causa Granger NO₂)

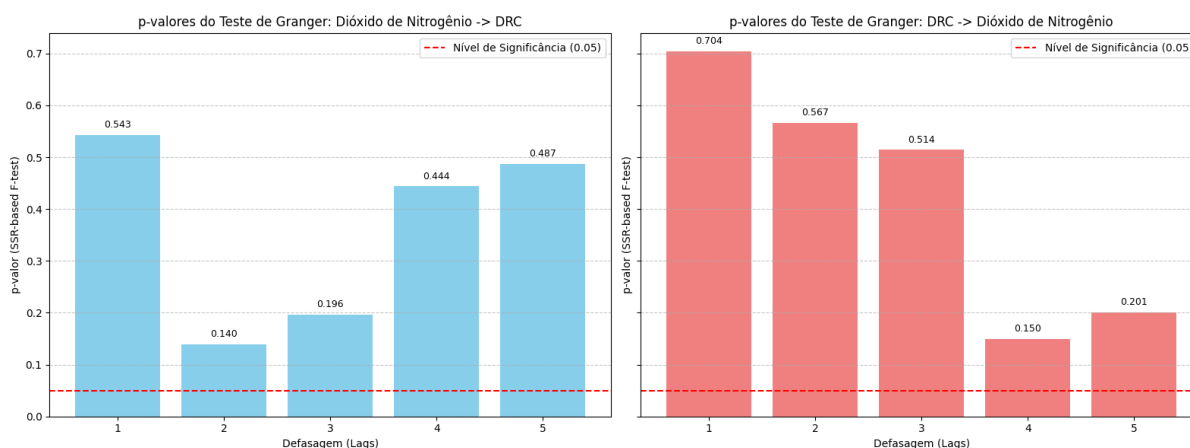
Partimos das hipóteses nulas “NO₂ não causa Granger DRC” e “DRC não causa Granger NO₂”, chegando nos achados representados na Figura 37.

Na direção de NO₂ para DRC, para todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p-valores (0,543; 0,140; 0,196; 0,444 e 0,487, respectivamente) são maiores que 0,05. Assim, para essas

defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não podemos concluir que o “NO₂ causa Granger na DRC” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

O mesmo pode ser observado na direção de DRC para NO₂, em que todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p-valores (0,704; 0,567; 0,514; 0,150 e 0,201, respectivamente) são maiores que 0,05, significando que não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que a “DRC causa Granger no NO₂” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Figura 37 – Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre NO₂ e internações por DRC.



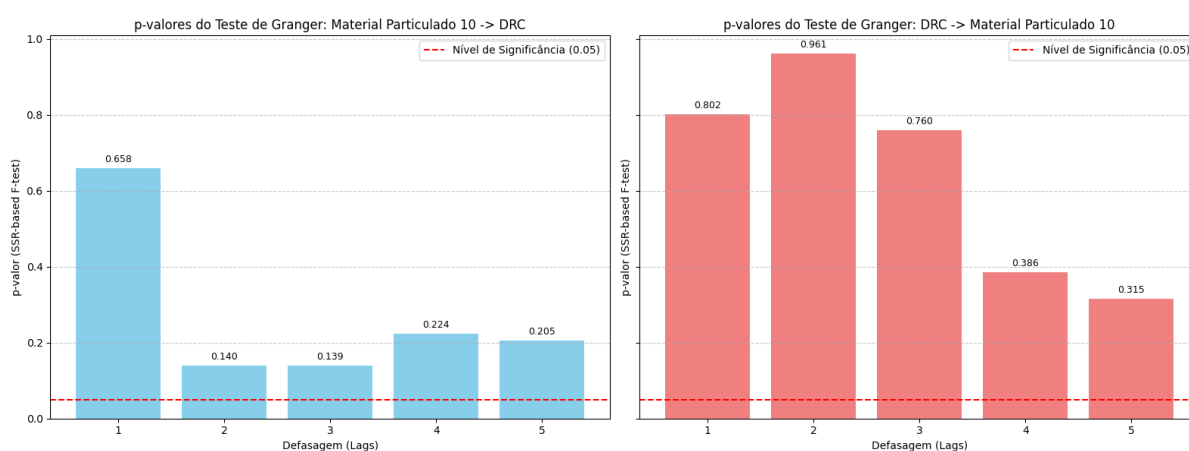
4.5.5 Teste de Causalidade de Granger entre Material Particulado 10 e internações por DRC (MP₁₀ causa Granger DRC) e entre internações por DRC e Material Particulado 10 (DRC causa Granger MP₁₀)

Partimos das hipóteses nulas “MP₁₀ não causa Granger DRC” e “DRC não causa Granger MP₁₀”, chegando nos achados exibidos na Figura 38.

Na direção de MP₁₀ para DRC, em todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p-valores (0,658; 0,140; 0,139; 0,224 e 0,205, respectivamente) são maiores que 0,05, ou seja, para essas defasagens não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que o “MP₁₀ causa Granger na DRC” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

O mesmo se observa na direção contrária – de DRC para MP_{10} –, em que para todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p-valores (0,802; 0,961; 0,760; 0,386 e 0,315, respectivamente) indicam que não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, também não se pode concluir que a “DRC causa Granger no MP_{10} ” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Figura 38 – Resultados dos p-valores dos testes de causalidade de Granger entre MP_{10} e internações por DRC.



4.5.6 Teste de Causalidade de Granger entre Ozônio e internações por Asma (Ozônio causa Granger Asma) e entre internações por Asma e Ozônio (Asma causa Granger Ozônio)

Partimos das hipóteses nulas “Ozônio não causa Granger Asma” e “Asma não causa Granger Ozônio”, chegando nos resultados demonstrados na Figura 39.

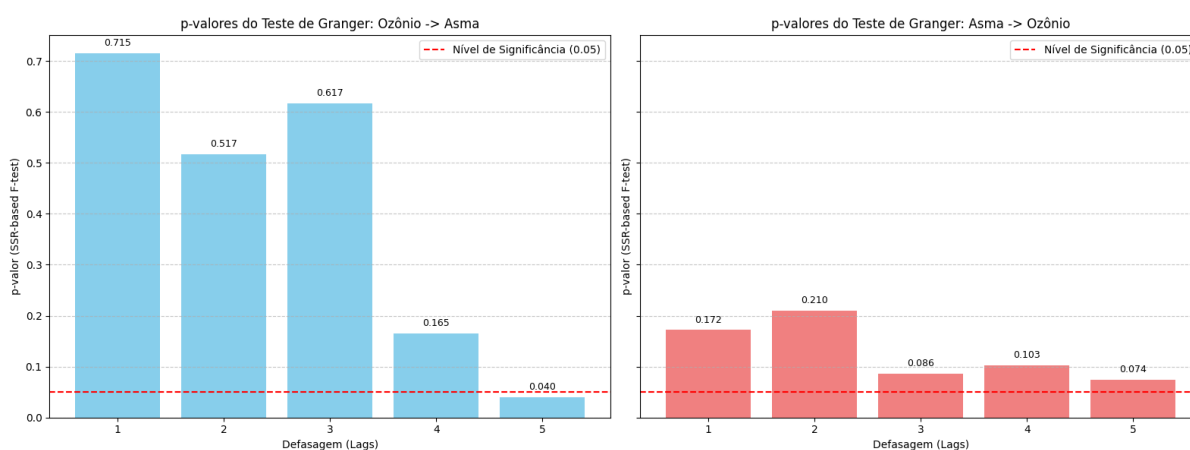
Na direção de Ozônio para asma, nas defasagens de 1, 2, 3 e 4 meses, os p-valores (0,715; 0,517; 0,617 e 0,165, respectivamente) são maiores que 0,05, apontando que, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que o “Ozônio causa Granger na asma”. Para uma defasagem de 5 meses, entretanto, o p-valor é 0,040, sugerindo que, com essa defasagem, os valores passados de Ozônio fornecem informações significativas para prever os valores futuros de internações por asma, indicando que o “Ozônio causa Granger na asma” nessa defasagem.

Na direção contrária – de asma para Ozônio –, em todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p-valores (0,172; 0,210; 0,086; 0,103 e 0,074, respectivamente) são maiores que 0,05,

indicando que, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que a “asma causa Granger no Ozônio” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Em resumo, os resultados sugerem que as concentrações de Ozônio podem ter um efeito preditivo sobre as concentrações de internações por asma com um atraso de 5 meses, mas o inverso não foi observado para as defasagens analisadas.

Figura 39 – Resultados dos p -valores dos testes de causalidade de Granger entre Ozônio e internações por Asma.



4.5.7 Teste de Causalidade de Granger entre Dióxido de Nitrogênio e internações por Asma (NO_2 causa Granger Asma) e entre internações por Asma e Dióxido de Nitrogênio (Asma causa Granger NO_2)

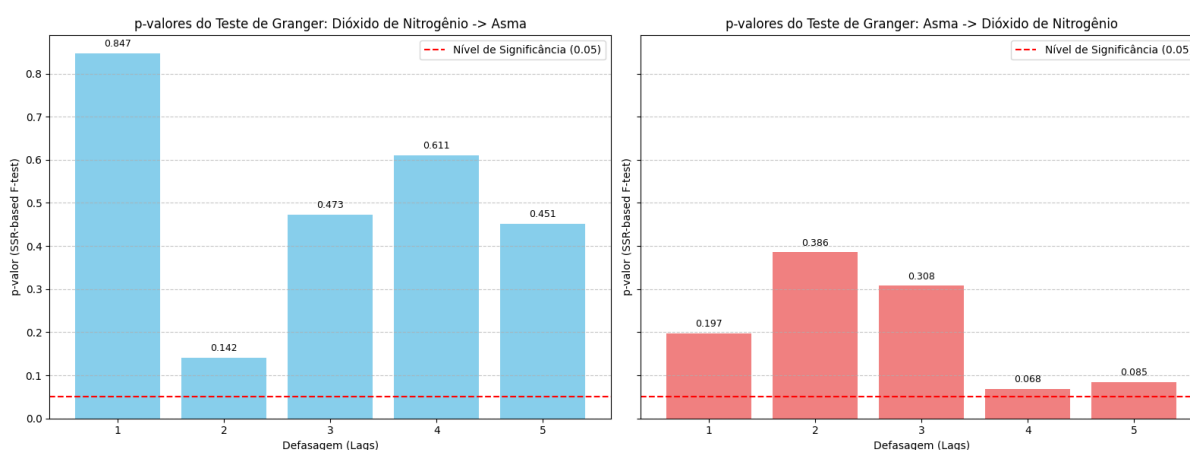
Partimos das hipóteses nulas “ NO_2 não causa Granger Asma” e “Asma não causa Granger NO_2 ”, chegando nos resultados exibidos na Figura 40.

Na direção de NO_2 para asma, em todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p -valores (0,847; 0,142; 0,473; 0,611 e 0,451, respectivamente) são maiores que 0,05, apontando que, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que o “ NO_2 causa Granger na asma” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

O mesmo se observa para todas as defasagens (de 1 a 5 meses), na direção oposta (de asma para NO_2), visto que os p -valores (0,197; 0,386; 0,308; 0,068 e 0,085, respectivamente) não possuem evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Assim, também não

se pode concluir que a “asma causa Granger no NO_2 ” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Figura 40 – Resultados dos p -valores dos testes de causalidade de Granger entre NO_2 e internações por Asma.



4.5.8 Teste de Causalidade de Granger entre Material Particulado 10 e internações por Asma (MP_{10} causa Granger Asma) e entre internações por Asma e Material Particulado 10 (Asma causa Granger MP_{10})

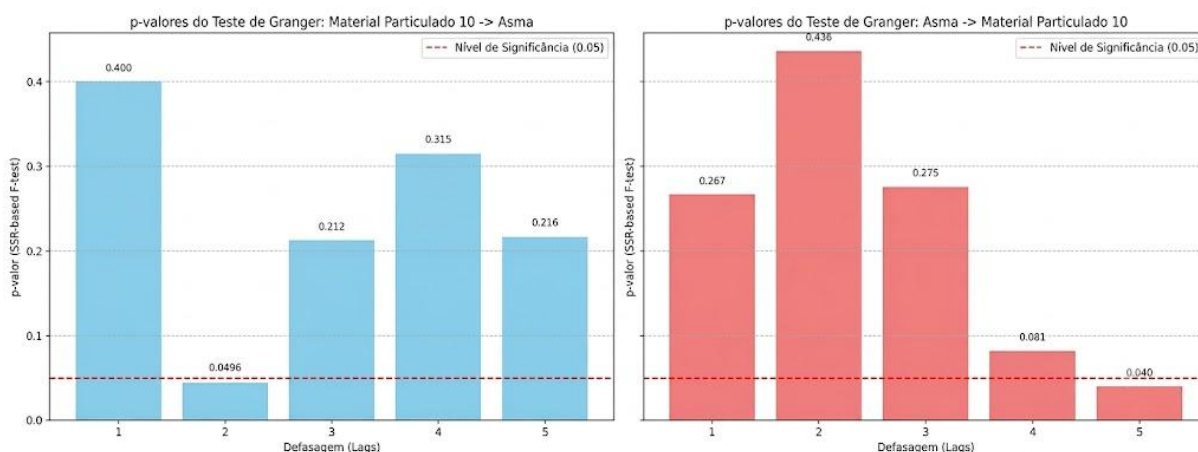
Partimos das hipóteses nulas “ MP_{10} não causa Granger Asma” e “Asma não causa Granger MP_{10} ”, chegando nos resultados demonstrados na Figura 41.

Na direção de MP_{10} para asma, nas defasagens de 1, 3, 4 e 5 meses, os p -valores (0,400; 0,212; 0,315 e 0,216, respectivamente) são maiores que 0,05, sugerindo que, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que o “ MP_{10} causa Granger na asma”. Contudo, para uma defasagem de 2 meses, o p -valor é 0,0496, ou seja, com essa defasagem, os valores passados de MP_{10} fornecem informações significativas para prever os valores futuros de internações por asma, indicando que o “ MP_{10} causa Granger na asma”.

Já na direção contrária, de asma para MP_{10} , nas defasagens de 1 a 4 meses, os p -valores (0,267; 0,436; 0,275 e 0,081, respectivamente) indicam que não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que a “asma causa Granger no MP_{10} ”. No entanto, para uma defasagem de 5 meses, o p -valor resultou em 0,040, o que sugere que, com uma defasagem de 5 meses, os valores passados de internações por asma

forneem informações significativas para prever os valores futuros de MP_{10} , indicando que a “asma causa Granger no MP_{10} ” nessa defasagem.

Figura 41 – Resultados dos p -valores dos testes de causalidade de Granger entre MP_{10} e interações por Asma.



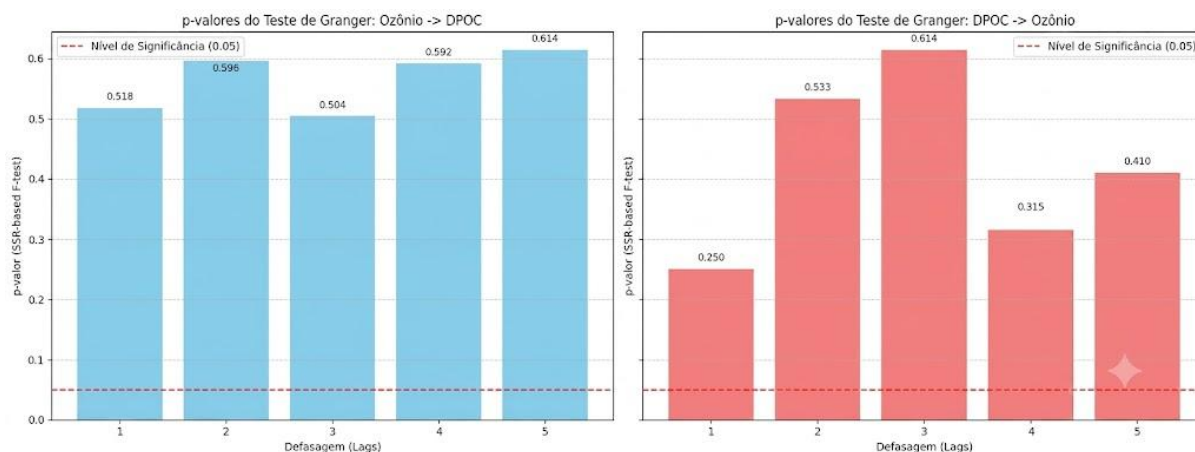
4.5.9 Teste de Causalidade de Granger entre Ozônio e interações por DPOC (Ozônio causa Granger DPOC) e entre interações por DPOC e Ozônio (DPOC causa Granger Ozônio)

Partimos das hipóteses nulas “Ozônio não causa Granger DPOC” e “DPOC não causa Granger Ozônio”, chegando nos achados ilustrados na Figura 42.

Na direção de Ozônio para DPOC, em todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p -valores (0,518; 0,596; 0,504; 0,592 e 0,614, respectivamente) apontam que não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que o “Ozônio causa Granger na DPOC” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Também na direção contrária (de DPOC para Ozônio), em todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p -valores (0,250; 0,533; 0,614; 0,315 e 0,410, respectivamente) são maiores que 0,05, ou seja, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que a “DPOC causa Granger no Ozônio” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Figura 42 – Resultados dos p -valores dos testes de causalidade de Granger entre Ozônio e interações por DPOC.



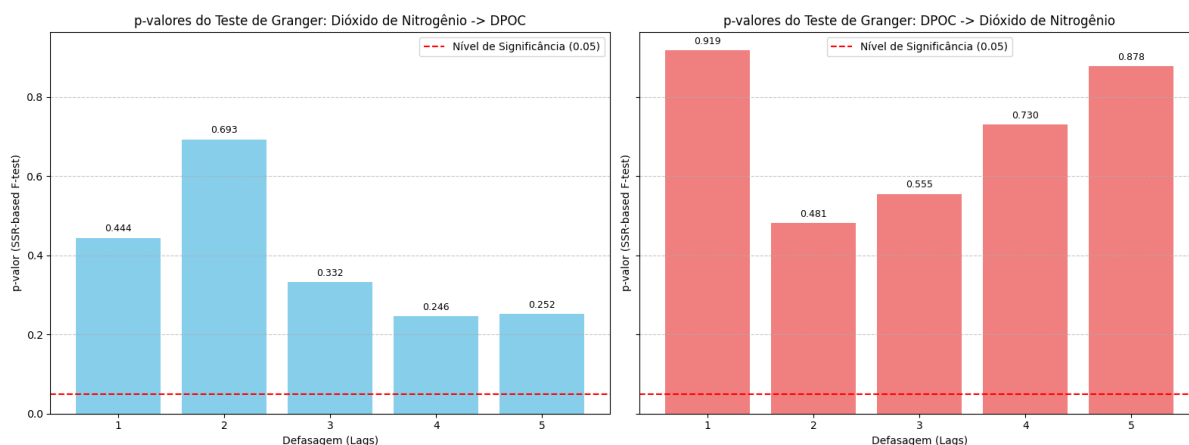
4.5.10 Teste de Causalidade de Granger entre Dióxido de Nitrogênio e interações por DPOC (NO_2 causa Granger DPOC) e entre interações por DPOC e Dióxido de Nitrogênio (DPOC causa Granger NO_2)

Partimos das hipóteses nulas “ NO_2 não causa Granger DPOC” e “DPOC não causa Granger NO_2 ”, chegando nos achados da Figura 43.

Na direção de NO_2 para DPOC, em todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p -valores (0,444; 0,693; 0,332; 0,246 e 0,252, respectivamente) são maiores que 0,05, indicando que, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Dessa forma, não se pode concluir que o “ NO_2 causa Granger na DPOC” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Na direção oposta, de DPOC para NO_2 , também em todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p -valores (0,919; 0,481; 0,555; 0,730 e 0,878, respectivamente) são maiores que 0,05, indicando que, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Assim sendo, não se pode concluir que a “DPOC causa Granger no NO_2 ” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Figura 43 – Resultados dos p -valores dos testes de causalidade de Granger entre NO_2 e interações por DPOC.



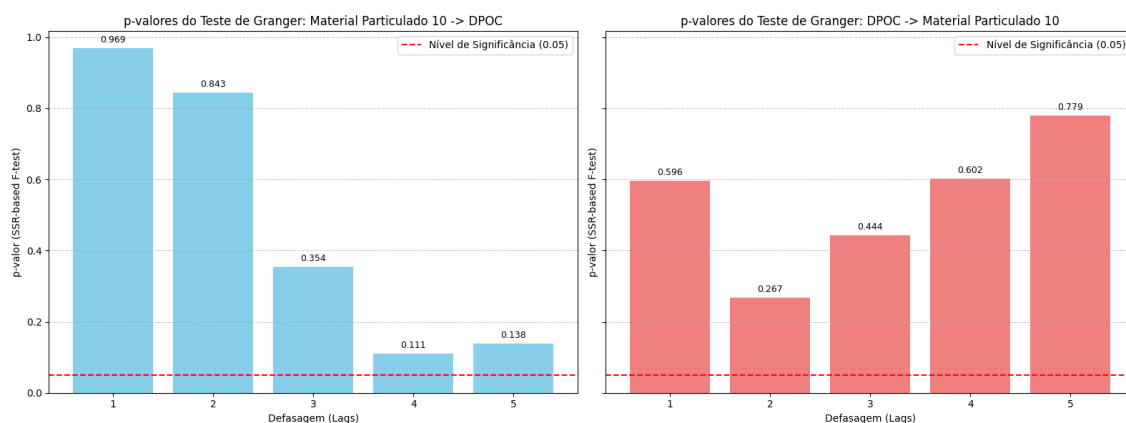
4.5.11 Teste de Causalidade de Granger entre Material Particulado 10 e interações por DPOC (MP_{10} causa Granger DPOC) e entre interações por DPOC e Material Particulado 10 (DPOC causa Granger MP_{10})

Partimos das hipóteses nulas “ MP_{10} não causa Granger DPOC” e “DPOC não causa Granger MP_{10} ”, chegando nos resultados representados na Figura 44.

Na direção de MP_{10} para DPOC, em todas as defasagens (de 1 a 5 meses), os p -valores (0,969; 0,843; 0,354; 0,111 e 0,138, respectivamente) são maiores que 0,05. Isso denota que, para essas defasagens, não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Desse modo, não se pode concluir que o “ MP_{10} causa Granger na DPOC” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

O mesmo se aplica à direção de DPOC para MP_{10} , em que todas as defasagens (de 1 a 5 meses), apresentam p -valores (0,596; 0,267; 0,444; 0,602 e 0,779, respectivamente) maiores que 0,05, indicando que não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Portanto, não se pode concluir que a “DPOC causa Granger no MP_{10} ” em nenhuma das defasagens testadas (até 5 meses).

Figura 44 – Resultados dos p -valores dos testes de causalidade de Granger entre MP_{10} e interações por DPOC.



4.5.12 Adequação do Teste de Causalidade de Granger à Realidade dos Poluentes das Cidades

A análise comparativa entre o referencial teórico e os dados obtidos pelo Teste de Causalidade de Granger permite compreender as dinâmicas temporais entre a poluição atmosférica e o agravamento das Doenças Respiratórias Crônicas (DRC), como a asma e a Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC).

Em relação ao Ozônio (O_3), os testes estatísticos revelaram que esse poluente “causa Granger” no grupo geral de DRC e na asma, especificamente na defasagem de 5 meses ($p = 0,029$ e $p = 0,040$, respectivamente), sem apresentar relações significativas nas defasagens mais curtas – de 1 a 4 meses. Essa constatação alinha-se à fundamentação teórica, que define o Ozônio troposférico como um poluente secundário, originado por reações fotoquímicas complexas impulsionadas pela radiação solar e pela temperatura. Por ser um potente oxidante que desencadeia estresse oxidativo e inflamação crônica no trato respiratório, o intervalo de 5 meses sugere um efeito de latência e acúmulo temporário, no qual o impacto das exposições em termos de agravos clínicos formais demanda um tempo de exposição cumulativa ou acompanha as variações sazonais do clima, conforme exposto por Nardocci *et al.* (2013).

Por outro lado, o comportamento do Material Particulado (MP_{10}) evidenciou respostas distintas entre as patologias analisadas, apresentando causalidade de Granger para a asma na defasagem de 2 meses ($p = 0,0496$), enquanto não demonstrou significância estatística para a DPOC isolada nem para o grupo geral de DRC em nenhuma das defasagens testadas. Esse

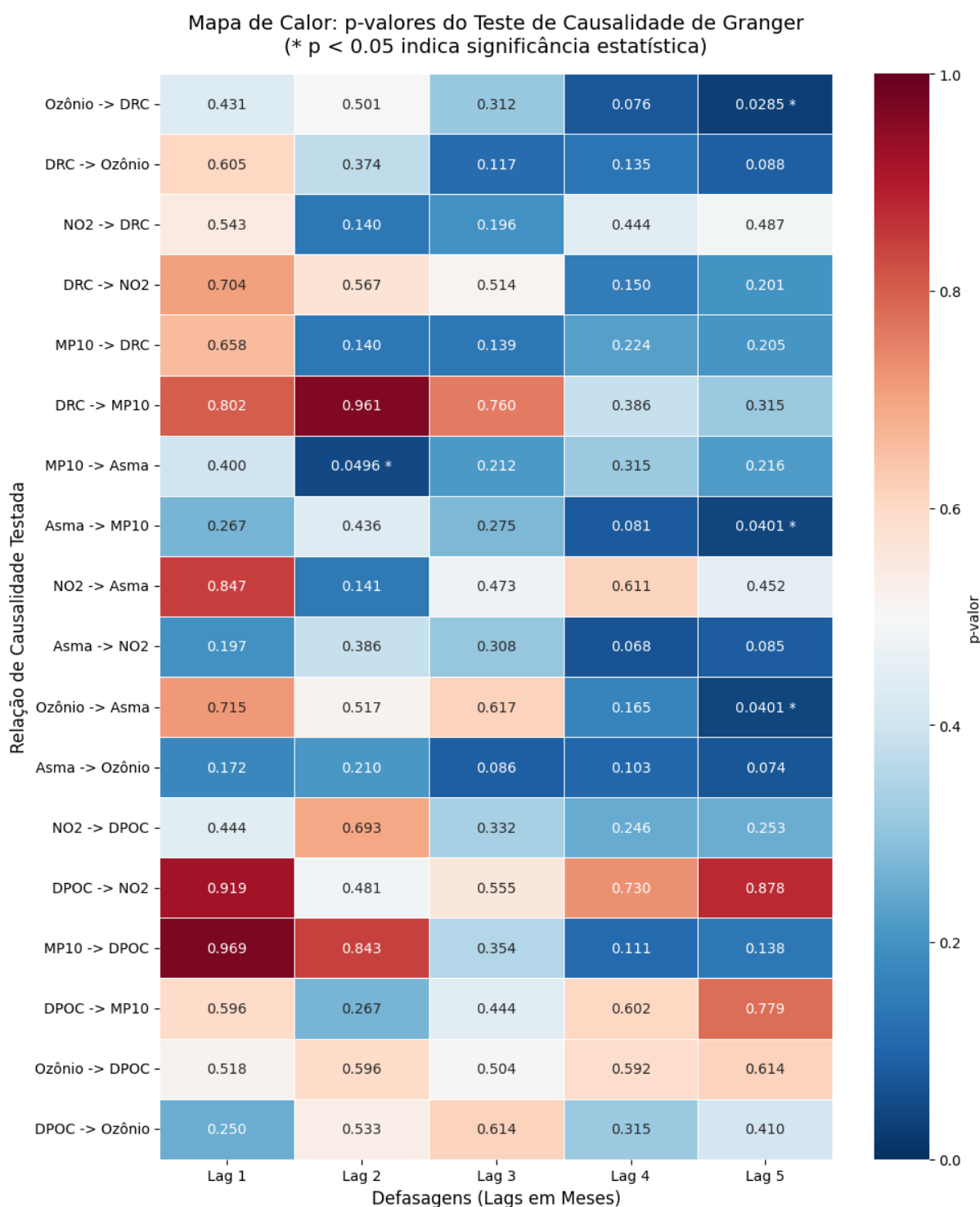
resultado reflete diretamente a literatura, como os estudos de Saldiva *et al.* (1995), Freitas *et al.* (2004) e Lei *et al.* (2023), que destacam que o material particulado provoca reações inflamatórias bronquiais agudas e de média duração com alta sensibilidade em pacientes asmáticos. Já no caso da DPOC, a literatura médica apresentada por Adeloye *et al.* (2015) e Agusti *et al.* (2018) a caracteriza como uma condição eminentemente progressiva, decorrente de remodelações teciduais ao longo de anos ou décadas de exposição crônica. Assim, a ausência de influência em horizontes temporais curtos de 1 a 5 meses é coerente com a fisiopatologia da doença e corrobora os achados de Abe & Miraglia (2018), que observaram estabilidade nas taxas de agravos por DPOC independentemente de variações pontuais na concentração de MP.

No que tange ao Dióxido de Nitrogênio (NO_2), a ausência de causalidade de Granger para DRC geral, asma ou DPOC em todas as defasagens analisadas ($p > 0,05$) dialoga com as particularidades das emissões urbanas locais descritas pelas normativas do CONAMA (2018) e pelos relatórios da CNI (2023). Embora investigações de longo prazo, como a realizada por Brunekreef *et al.* (2021), associem o NO_2 a riscos respiratórios gerais decorrentes do tráfego veicular, pesquisas em centros urbanos como São Paulo, a exemplo do estudo de Araujo & Araujo (2020), indicam que os efeitos isolados dos poluentes veiculares podem ser mascarados por variáveis meteorológicas ou socioeconômicas, fazendo com que fiscalizações de emissões ou oscilações pontuais do gás não gerem impactos diretos e estatisticamente perceptíveis no curto prazo.

Por fim, o teste apontou uma causalidade de Granger no sentido inverso, em que a asma antecede estatisticamente a variação do MP_{10} na defasagem de 5 meses ($p = 0,040$). Como a incidência de doenças ou internações não altera diretamente a concentração física de poluentes na atmosfera, esse achado estatístico pode estar refletindo um fenômeno de sazonalidade oculta, no qual os períodos de maior prevalência de crises asmáticas coincidem, de forma defasada, com meses mais frios e secos, caracterizados por fenômenos de inversão térmica, os quais retêm o MP_{10} no ambiente urbano, conforme reportado pela CETESB (2023) e por Nardocci *et al.* (2013).

Para melhor visualização dos p -valores dos testes de causalidade de Granger encontrados para cada uma das relações entre doenças e poluentes, bem como seus *lags*, elaborou-se um mapa de calor onde se observa de forma clara os valores significativos (inferiores ao limite de 0,05) na tonalidade azul escura (Figura 45).

Figura 45 – Mapa de calor: *p*-valores dos testes de causalidade de Granger.



A análise da Causalidade de Granger pode indicar que a poluição atmosférica em São Caetano do Sul antecede temporalmente o aumento das internações por Doenças Respiratórias Crônicas, como Asma e DPOC. Essa relação temporal (lag effect) demonstra que a exposição

aos poluentes tende a gerar um efeito acumulativo e insidioso na saúde pulmonar, desencadeando processos inflamatórios que culminam em exacerbações agudas e na necessidade de hospitalização semanas ou meses após os picos de contaminação. Para a saúde da população, esses achados evidenciam uma janela epidemiológica de risco que afeta sobretudo grupos vulneráveis, como crianças e idosos. Saber que o ar poluído é um preditor de crises possibilita a criação de sistemas de alerta precoce, orientando pacientes e cuidadores a reforçar o tratamento preventivo e evitar a exposição nos períodos de maior criticidade.

Para a gestão do SUS, o teste de Granger transforma dados ambientais em um instrumento de planejamento preditivo. Em vez de atuar de forma reativa frente à superlotação das emergências, os gestores públicos passam a prever a demanda por leitos e insumos. Isso permite reforçar preventivamente as Unidades Básicas de Saúde, otimizar o dimensionamento das equipes nos prontos-socorros e garantir o fornecimento de medicamentos antes que a onda de internações se concretize.

4.6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Destacam-se algumas limitações que restringem o alcance dos resultados deste estudo. Por se tratar de um estudo ecológico com dados agregados, os coeficientes de correlação refletem associações apenas em nível populacional, não permitindo inferir causalidade no nível individual (falácia ecológica). Além disso, o uso de dados agregados mascara variações individuais e impede o estabelecimento de relações causais diretas entre fatores e desfechos.

Ademais, os dados de morbidade foram obtidos exclusivamente do Sistema de Informações Hospitalares do SUS (SIH-SUS), capturando apenas as internações ocorridas no âmbito do sistema público de saúde, uma vez que não estão disponíveis informações dos sistemas privado e suplementar. Além disso, não foram incluídos os casos ambulatoriais que não evoluíram para hospitalização.

Adicionalmente, fatores de confundimento, tais como condições socioeconômicas e de acesso aos serviços de saúde, podem distorcer as associações observadas. A dependência da qualidade e da completude dos dados da CETESB e do DATASUS, por sua vez, pode introduzir vieses de informação.

Por fim, os dados de qualidade do ar utilizados neste estudo derivam de estações fixas de monitoramento, as quais, embora qualificadas e padronizadas, pressupõem uma exposição homogênea da população. Tal pressuposto pode desconsiderar microcenários e gradientes de poluição mais intensos, especialmente em vias de tráfego elevado no município.

Apesar dessas limitações metodológicas, a pesquisa oferece evidências relevantes sobre a associação entre poluição atmosférica e saúde respiratória em São Caetano do Sul, contribuindo para o aprimoramento de políticas públicas de proteção à saúde.

5 CONCLUSÕES

A presente dissertação de mestrado propôs-se a investigar e analisar a complexa interação entre os poluentes atmosféricos e as complicações de agravos à saúde respiratória no município de São Caetano do Sul entre os anos de 2010 e 2023, sob a ótica integradora das Cidades Inteligentes e Sustentáveis. Ao cruzar as bases de dados epidemiológicos do DATASUS com os registros de monitoramento de qualidade do ar da CETESB, este estudo decifrou padrões de comportamento que possuem implicações tanto para a literatura científica quanto para a governança pública local.

Os achados desta pesquisa levam a crer que a hipótese central de que a exposição crônica a poluentes de origem predominantemente veicular e industrial constitui um fator relevante para o adoecimento respiratório da população. A identificação de uma correlação linear anual entre as internações por Doenças Respiratórias Crônicas e os níveis de Dióxido de Nitrogênio (NO_2) e Material Particulado (MP_{10}) evidencia o custo biológico e epidemiológico imposto pelo modelo de mobilidade urbana concentrado em combustíveis fósseis, alinhando São Caetano do Sul às evidências reportadas por grandes consórcios internacionais de saúde, como o projeto Europeu ELAPSE.

Por outro lado, a volatilidade identificada nas análises mensais e o comportamento contraintuitivo do Ozônio (O_3), explicado pelo efeito de titulação química nas zonas de tráfego denso, demonstram que o impacto da poluição na saúde não é um fenômeno puramente linear ou estático. O microclima regional, os regimes de ventos e os fenômenos sazonais de inversão térmica agem como potentes moduladores ambientais. Ademais, o declínio drástico e atípico nas internações por DRC observado no ano de 2020 acabou se tornando um experimento natural involuntário, podendo indicar que a redução na circulação de veículos e o isolamento físico geram um alívio imediato na pressão sobre o Sistema Único de Saúde.

Sob a perspectiva da gestão pública moderna, esta dissertação conclui que o manejo da qualidade do ar e a proteção das populações vulneráveis (notadamente a crescente parcela idosa do município) demandam uma transição urgente para o paradigma de Cidades Inteligentes. Políticas baseadas em médias anuais mostram-se insuficientes. Faz-se mandatória a implementação de infraestruturas tecnológicas responsivas, tais como redes de sensores IoT em tempo real e modelos preditivos que permitam uma governança ambiental baseada em dados, gerando alertas ativos à comunidade antes que os picos sazonais de poluição se convertam em exacerbações clínicas e internações hospitalares de alto custo.

Ao fornecer métricas empíricas locais, este trabalho não apenas preenche uma lacuna acadêmica relativa à saúde ambiental no ABC Paulista, mas também se estabelece como um documento norteador para que o município oriente suas políticas de planejamento urbano em consonância com padrões internacionais, como a Norma ISO 37120, e com as metas globais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 3, ODS 11 e ODS 13) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas.

A fim de dar continuidade e profundidade à pesquisa inaugurada por esta dissertação, sugerem-se algumas abordagens para investigações futuras, como a aplicação de Modelos Aditivos Generalizados (GAM) ou Modelos de Regressão de *Poisson* para analisar os efeitos de *lag* (atraso temporal de 1 a 7 dias) entre o pico de emissão de um poluente e o subsequente desfecho de internação hospitalar. Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de análises que considerem a exposição simultânea a múltiplos gases e partículas, avaliando o efeito sinérgico ou de confusão entre o material particulado fino, compostos orgânicos voláteis e o ozônio.

6 REFERÊNCIAS

- Abe, K. C., & Miraglia, S. G. E. K. (2018). HEALTH IMPACT ASSESSMENT OF AUTOMOTIVE VEHICLES AIR POLLUTION CONTROL PROGRAM IN SÃO PAULO, SP, BRAZIL. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais*, (47), 61–73. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820180310>
- Adeloye, D., Chua, S., Lee, C., Basquill, C., Papana, A., Theodoratou, E., Nair, H., Gasevic, D., Sridhar, D., Campbell, H., Chan, K. Y., Sheikh, A., & Rudan, I. (2015). Global and regional estimates of COPD prevalence: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Global Health*, 5(2), 020415. <https://doi.org/10.7189/jogh.05-020415>
- Agusti, A., Faner, R., Celli, B., & Rodriguez-Roisin, R. (2018). Precision medicine in COPD exacerbations. *The Lancet Respiratory Medicine*, 6(9), 657–659. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(18\)30296-0](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(18)30296-0)
- ANFAVEA. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/anuarios-2/>. Acesso em: 23 mar. 2025.
- Anuário Brasileiro de Segurança Pública. Fórum Brasileiro de Segurança Pública, São Paulo, 2025. Disponível em: <https://forumseguranca.org.br/publicacoes/anuario-brasileiro-de-seguranca-publica/>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- Anversa, L. Como é Morar em São Caetano do Sul?. *Revista Exame. Brasil*, 2024. Disponível em: <https://exame.com/mercado-imobiliario/como-e-morar-em-sao-caetano-do-sul/>. Acesso em: 01 abr. 2025.
- APHA. American Public Health Association. Air Pollution and Public Health. Mudanças Climáticas e Saúde: Saúde Respiratória Washington, DC, 2023. Disponível em: <https://www.apha.org/topics-and-issues/climate-health-and-equity/air-quality>: acesso em: 25 mar. 2025.
- Araujo, O. R. de ., & Araujo, M. C.. (2020). The zero impact of the Vehicle Inspection Program on public health in São Paulo, SP. *Revista De Saúde Pública*, 54, 84. <https://doi.org/10.11606/s1518-8787.2020054001856>
- ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO. Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil. Brasília: PNUD, 2010. Disponível em: www.atlasbrasil.org.br. Acesso em: 20 mar. 2025.

Barnes, P. J. (2016). Inflammatory mechanisms in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 138(1), 16-27. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2016.05.011>

Blanc, P. D., Annesi-Maesano, I., Balmes, J. R., Cummings, K. J., Fishwick, D., Miedinger, D., Murgia, N., Naidoo, R. N., Reynolds, C. J., Sigsgaard, T., Torén, K., Vinnikov, D., & Redlich, C. A. (2019). The occupational burden of nonmalignant respiratory diseases. An official American Thoracic Society and European Respiratory Society statement. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 199(11), 1312-1334. <https://doi.org/10.1164/rccm.201904-0717ST>

Bloom, D. E., Cafiero, E. T., Jané-Llopis, E., Abrahams-Gessel, S., Bloom, L. R., Fathima, S., Feigl, A. B., Gaziano, T., Mowafi, M., Pandya, A., Prettnner, K., Rosenberg, L., Seligman, B., Stein, A. Z., & Weinstein, C. (2011). The global economic burden of noncommunicable diseases. Geneva. World Economic Forum.

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). Time series analysis: Forecasting and control. John Wiley & Sons.

Brasil. Ministério da Saúde. e-Gestor Atenção Primária à Saúde, Cobertura da Atenção Primária (PNS 2020 - 2023) 2025. Disponível em: <https://relatorioaps.saude.gov.br/cobertura/pns>. Acesso em: 09 abr. 2025.

Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde - SESAUD. Departamento de Atenção Básica. Doenças respiratórias crônicas / Ministério da Saúde, Secretaria de Atenção à Saúde, Departamento de Atenção Básica. – Brasília: Ministério da Saúde, 2010. 160 p.: il. – (Série A. Normas e Manuais Técnicos) (Cadernos de Atenção Básica, n. 25).

Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Saúde Ambiental, do Trabalhador e Vigilância das Emergências em Saúde Pública. Poluição atmosférica na ótica do Sistema Único de Saúde: vigilância em saúde ambiental e qualidade do ar [recurso eletrônico] / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Saúde Ambiental, do Trabalhador e Vigilância das Emergências em Saúde Pública. – Brasília: Ministério da Saúde, 2021. https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/poluicao_atmosferica_SUS_saude_ambiental.pdf

Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Poluentes Atmosféricos. Março 2024. <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos.html>

BRASIL. Tribunal Superior Eleitoral. Resultados Eleições 2022. Dados Abertos. Disponível em: dadosabertos.tse.jus.br/dataset/resultados-2022. Acesso em: 09 abr. 2025.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018.

Brauer, M., Brook, J. R., Christidis, T., Chu, Y., Crouse, D. L., Erickson, A., Hystad, P., Li, C., Martin, R. V., Meng, J., Pappin, A. J., Pinault, L. L., Tjepkema, M., van Donkelaar, A., Weagle, C., Weichenthal, S., & Burnett, R. T. (2022). Mortality-Air Pollution Associations in Low Exposure Environments (MAPLE): Phase 2. Research report (Health Effects Institute), 212, 1–91.

Brunekreef, B., Strak, M., Chen, J., Andersen, Z. J., Atkinson, R., Bauwelinck, M., Bellander, T., Boutron, M. C., Brandt, J., Carey, I., Cesaroni, G., Forastiere, F., Fecht, D., Gulliver, J., Hertel, O., Hoffmann, B., de Hoogh, K., Houthuijs, D., Hvidtfeldt, U., Janssen, N., ... Hoek, G. (2021). Mortality and Morbidity Effects of Long-Term Exposure to Low-Level PM_{2.5}, BC, NO₂, and O₃: An Analysis of European Cohorts in the ELAPSE Project. Research report (Health Effects Institute), 208, 1–127.

C40 Cities. (2020). Air Quality Initiative. Disponível em: <https://www.c40.org/what-we-do/scaling-up-climate-action/air-quality/>. Acesso em 15 abr. 2025.

Caiaffa, W. T., & Friche, A. A. L. (2012). Urbanização e segurança viária: um diálogo possível em busca de equidade? *Ciência e Saúde Coletiva*, 17(5), 1245-1246.

Carneiro, F. G. (1997). A metodologia dos testes de causalidade em economia (Série Textos Didáticos n. 20). Brasília, DF: Universidade de Brasília.

Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>

CETESB. (2020). Ficha de Informação Toxicológica SO₂. Fevereiro 2024, Disponível em: https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=DI%C3%93XI DO%20DE%20ENXOFRE. Acesso em: 14 abr. 2025.

CETESB. (2023). A inversão térmica e seu impacto na qualidade do ar. Julho 2023, Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2023/11/07/a-inversao-termica-e-seu-impacto-na-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CETESB. (2023). Padrões de Qualidade do Ar. Retrieved April 2024, from <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroles-de-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CETESB. (n. d.). QUALAR - Sistema de Informações da Qualidade do Ar. Retrieved April 2024, from <https://qualar.cetesb.sp.gov.br>.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. Retrato da Indústria Brasileira. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/estatisticas/retratos-da-sociedade-brasileira/>. Acesso em: 23 mar. 2025.

CNM. Confederação Nacional de Municípios. Análise do impacto da frota de veículos nos Municípios brasileiros. Brasília, 2023. Disponível em: https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2023/Estudos_tecnicos/202309_ET_MOB_Impacto_frota_veiculos.pdf. Acesso em: 23 mar. 2025.

Corá, B., Leirião, L. F. L., & Miraglia, S. G. E. K. (2020). IMPACT OF AIR POLLUTION ON PUBLIC HEALTH IN HIGH INDUSTRIALIZED MUNICIPALITIES IN THE STATE OF SÃO PAULO. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais*, 55(4), 498–509. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200671>

Dalla, J. B. (2011). Efeitos Da Poluição do Ar e dos Fatores Meteorológicos nas doenças Cardiovasculares no Município de São Caetano do Sul. Iniciação Científica- USCS. http://www.uscs.edu.br/pesquisasacademicas/images/pesquisas/jaqueline_brigitte.pdf

DATASUS. Departamento de Informática do SUS. Brasília: Ministério da Saúde, 2021, 2023, 2025. Disponível em: datasus.saude.gov.br. Acesso em: 20 mar. 2025.

DATASUS. Indicadores e Dados Básicos. Departamento de Informática do SUS. Brasília, DF, 2021. Disponível em: tabnet.datasus.gov.br. Acesso em: 23 mar. 2025.

DENATRAN. Departamento Nacional de Trânsito. Frota de Veículos. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022>. Acesso em: 23 mar. 2025.

Dino. (2026, June 24). Acesso ao tratamento para DPOC é desigual nos país. *Valor Econômico*. <https://valor.globo.com/patrocinado/dino/noticia/2026/06/24/acesso-ao-tratamento-para-dpoc-e-desigual-nos-pais-1.ghtml>

Driscoll, C. T., Lawrence, G. B., Bulger, A. J., Butler, T. J., Cronan, C. S., Eagar, C., Lambert, K. F., Likens, G. E., Stoddard, J. L., & Weathers, K. C. (2001). Acidic Deposition in the Northeastern United States: Sources and Inputs, Ecosystem Effects, and Management

Strategies. *BioScience*, 51(3), 180-198. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0180:ADITNU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0180:ADITNU]2.0.CO;2).

European Environment Agency. (2019). Air quality in Europe — 2019 report. Publications Office of the European Union. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-in-europe-2019>.

European Environment Agency. (2020). Air quality and COVID-19. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-in-europe-2020-report>.

Ferreira, M. L. (2005). Os arquivos da administração pública nos municípios do grande ABC paulista - a busca do fio de Ariadne [Master's thesis]. Universidade de São Paulo.

FIA Business School (2023). Cidades inteligentes: saiba o que são e quais suas características. Disponível em: <<https://fia.com.br/blog/cidades-inteligentes/>>.

Florida, R., Rodríguez-Pose, A., & Storper, M. (2021). Cities in a post-COVID world. *Urban Studies*, 60(8), 004209802110180. <https://doi.org/10.1177/00420980211018072>

Freitas, C., Bremner, S. A., Gouveia, N., Pereira, L. A. A., & Saldiva, P. H. N.. (2004). Internações e óbitos e sua relação com a poluição atmosférica em São Paulo, 1993 a 1997. *Revista De Saúde Pública*, 38(6), 751–757. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102004000600001>

Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier van der Gon, H., Facchini, M. C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., Nemitz, E., Pandis, S., Riipinen, I., Rudich, Y., Schaap, M., Slowik, J. G., Spracklen, D. V., Vignati, E., Wild, M., ... Gilardoni, S. (2015). Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(14), 8217-8299. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>.

Giroto, Eduardo. (2011). ESCOLA, LUGAR E PODER: UMA ANÁLISE GEOGRÁFICA A PARTIR DE SÃO CAETANO DO SUL, SP, BRASIL. *GEOUSP: Espaço e Tempo* (Online). 15. 77. [10.11606/issn.2179-0892.geousp.2011.74233](https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2011.74233).

Grigsby, M., Siddharthan, T., Chowdhury, M. A., Siddiquee, A., Rubinstein, A., Sobrino, E., Miranda, J. J., Bernabe-Ortiz, A., Alam, D., & Checkley, W. (2016). Socioeconomic status and COPD among low- and middle-income countries. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 11, 2497-2507. <https://doi.org/10.2147/COPD.S111145>

Grupo Executivo do Comitê Interministerial de Mudança do Clima (GEx-CIM). (2015). Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Ministério do Meio Ambiente, Brasília.

- Disponível em: https://www.mds.gov.br/webarquivos/arquivo/seguranca_alimentar/caisan/Publicacao/Caisan_Nacional/PlanoNacionaldeAdaptacaoMudancadoClima_Junho2015.pdf
- Guarnieri, M., & Balmes, J. R. (2014). Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet*, 383(9928), 1581-1592. doi: 10.1016/S0140-6736(14)60617-6.
- Harkema, J. R., Keeler, G., Wagner, J., Morishita, M., Timm, E., Hotchkiss, J., Marsik, F., Dvonch, T., Kaminski, N., & Barr, E. (2004). Effects of concentrated ambient particles on normal and hypersecretory airways in rats. Research report (Health Effects Institute), 120, 1–79.
- Holst, G. J., Pedersen, C. B., Thygesen, M., Brandt, J., Geels, C., Bønløkke, J. H., & Sigsgaard, T. (2020). Air pollution and family related determinants of asthma onset and persistent wheezing in children: nationwide case-control study. *BMJ (Clinical research ed.)*, 370, m2791. <https://doi.org/10.1136/bmj.m2791>
- Hong, Y., & Lee, S. H. (2019). Effectiveness of tele-monitoring by patient severity and intervention type in chronic obstructive pulmonary disease patients: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Nursing Studies*, 92, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2018.12.006>
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). Forecasting: principles and practice. OTexts. Disponível em: otexts.com. Acesso em: 09 abr. 2025.
- IBGE. (2018). Estimativas da população - 2018. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>
- IBGE. Contas Regionais. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9054-contas-regionais-do-brasil.html>. Acesso em: 23 mar. 2025.
- IBGE. Estimativas da população residente: Resultados revisados de 2024. Rio de Janeiro, RJ 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- IBGE. Estimativas da População. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-caetano-do-sul/panorama>. Acesso em: 23 mar. 2025.

IBGE. Frotas de Veículos. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, 2026. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120>. Acesso em: 23 abr. 2026.

IDEB. Índice de Desenvolvimento da Educação Básica, Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/pesquisas-estatisticas-e-indicadores/ideb>. Acesso em: 20 mar. 2025.

IFDM. Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal, Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/ifdm/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

INEP. Censo Escolar. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/pesquisas-estatisticas-e-indicadores/censo-escolar>. Acesso em: 23 mar. 2025.

INEP. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira, Brasília, 2025. Disponível em: www.portal.inep.gov.br. Acesso em: 20 mar. 2025.

ISO. International Organization for Standardization. ISO Standards. Geneva, 2025. Disponível em: <https://www.iso.org/standards.html>. Acesso em: 23 mar. 2025.

ITU. International Telecommunication Union. Defining Smart Sustainable Cities. Geneva, 2021. Disponível em: https://www.itu.int/en/ITU-T/ssc/united/Documents/Reports-on-SSC/ITU_smart_sustainable_cities_brochure.pdf?csf=1&e=yIueWP. Acesso em: 23 mar. 2025.

Jackson, D. J., & Gern, J. E. (2022). Rhinovirus Infections and Their Roles in Asthma: Etiology and Exacerbations. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice*, 10(3), 673–681. <https://doi.org/10.1016/j.jaip.2022.01.006>

Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 120, 475-483. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2015.08.087](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087).

Kelly, F., Armstrong, B., Atkinson, R., Anderson, H. R., Barratt, B., Beevers, S., Cook, D., Green, D., Derwent, D., Mudway, I., Wilkinson, P., & HEI Health Review Committee (2011). The London low emission zone baseline study. Research report (Health Effects Institute), 163, 3–79.

Lamprecht, B., Soriano, J. B., Studnicka, M., Kaiser, B., Vanfleteren, L. E., Gnatiuc, L., Burney, P., Miravittles, M., García-Rio, F., Akbari, K., Ancochea, J., Menezes, A. M., Perez-

- Padilla, R., Montes de Oca, M., Torres-Duque, C. A., Caballero, A., González-García, M., Buist, S., & BOLD Collaborative Research Group, the EPI-SCAN Team, the PLATINO Team, and the PREPOCOL Study Group. (2015). Determinants of underdiagnosis of COPD in national and international surveys. *Chest*, 148(4), 971-985. <https://doi.org/10.1378/chest.14-2535>
- Lei, J., Chen, R., Liu, C., Zhu, Y., Xue, X., Jiang, Y., Shi, S., Gao, Y., Kan, H., & Xuan, J. (2023). Fine and coarse particulate air pollution and hospital admissions for a wide range of respiratory diseases: a nationwide case-crossover study. *International journal of epidemiology*, 52(3), 715–726. <https://doi.org/10.1093/ije/dyad056>
- Liu, S., Jørgensen, J. T., Ljungman, P., Pershagen, G., Bellander, T., Leander, K., Magnusson, P. K., Rizzuto, D., Hvidtfeldt, U. A., Raaschou-Nielsen, O., Wolf, K., Hoffmann, B., Brunekreef, B., Strak, M., Chen, J., Mehta, A., Atkinson, R. W., Bauwelinck, M., Varraso, R., ... Andersen, Z. J. (2021). Long-term exposure to low-level air pollution and incidence of chronic obstructive pulmonary disease: The ELAPSE project. *Environment International*, 146, 106267. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106267>
- Martinez, F. D. (2016). Early-life origins of chronic obstructive pulmonary disease. *New England Journal of medicine*, 375(9), 871-878. <https://doi.org/10.1056/NEJMra1603287>
- Mathers, C. D., & Loncar, D. (2006). Projections of global mortality and burden of disease from 2002 to 2030. *PLoS Medicine*, 3(11), e442. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0030442>
- McDuffie, E., Martin, R., Yin, H., & Brauer, M. (2021). Global Burden of Disease from Major Air Pollution Sources (GBD MAPS): A Global Approach. Research report (Health Effects Institute), 210, 1–45.
- Miraglia, S. G. E. K., & Gouveia, N.. (2014). Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras. *Ciência & Saúde Coletiva*, 19(10), 4141–4147. <https://doi.org/10.1590/1413-812320141910.09232014>
- MME. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2021. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 23 mar. 2025.
- Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K. S., Mills, G. E., Stevenson, D. S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidemesser, E., Sommariva, R., Wild, O., & Williams, M. L. (2015). Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate

forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(15), 8889-8973. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>.

Mueller, N., Rojas-Rueda, D., Khreis, H., Cirach, M., Milà, C., Espinosa, A., Foraster, M., McEachan, R. R. C., Kelly, B., Wright, J., & Nieuwenhuijsen, M. (2020). Changing the urban design of cities for health: The superblock model. *Environment International*, 134, 105132. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105132>

Nardocci, A. C., Freitas, C. U., Leon, A. C. M. P., Junger, W. L., & Gouveia, N. C. (2013). Poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares: estudo de séries temporais em Cubatão, São Paulo. *Cadernos de Saúde Pública*, 29(9), 1867-1876. <http://www.scielo.br/pdf/csp/v29n9/a25v29n9.pdf>

Oliveira, B. F. A. (2011). Avaliação do risco para saúde infantil relativa à exposição ao PM_{2,5} proveniente da queima de biomassa no município de Tangará da Serra - MT. FIOCRUZ. <https://bvssp.icict.fiocruz.br/lildbi/docsonline/get.php?id=2410>

Organização das Nações Unidas - ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável Brasília, 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 09 de abr. 2025.

PMSCS. Prefeitura Municipal de São Caetano do Sul, 2, 2025. Disponível em: <https://www.saocaetanodosul.sp.gov.br/noticia/5315>.

PMSCS. Prefeitura Municipal de São Caetano do Sul. Plano Municipal de Saneamento Básico. São Caetano do Sul, 2021. Disponível em: <http://www.daescs.sp.gov.br/pagina/plano-municipal-residuos>. Acesso em: 23 mar. 2025.

Postma, D. S., Bush, A., & van den Berge, M. (2015). Risk factors and early origins of chronic obstructive pulmonary disease. *The Lancet*, 385(9971), 899-909. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60446-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60446-3)

Programa Cidades Sustentáveis. Índice de desenvolvimento sustentável das cidades permite ver onde estão os maiores problemas urbanos. 2022 Disponível em: <<https://www.cidadessustentaveis.org.br/noticia/3204?palavra-chave=sao%20caetano%20do%20sul>>. Acesso em: 12 abr. 2025.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD. Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, Brasília, 2025. Disponível em: www.atlasbrasil.org.br. Acesso em: 20 mar. 2025.

Rabe, K. F., & Watz, H. (2017). Chronic obstructive pulmonary disease. *The Lancet*, 389(10082), 1931-1940. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)31222-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)31222-9)

- Ritchie, A. I., & Wedzicha, J. A. (2020). Definition, causes, pathogenesis, and consequences of chronic obstructive pulmonary disease exacerbations. *Clinics in Chest Medicine*, 41(3), 421-438. <https://doi.org/10.1016/j.ccm.2020.06.007>
- Saldiva, P. H., Pope, C. A., 3rd, Schwartz, J., Dockery, D. W., Lichtenfels, A. J., Salge, J. M., Barone, I., & Bohm, G. M. (1995). Air pollution and mortality in elderly people: a time-series study in Sao Paulo, Brazil. *Archives of environmental health*, 50(2), 159–163. <https://doi.org/10.1080/00039896.1995.9940893>
- Salvi, S. S., & Barnes, P. J. (2009). Chronic obstructive pulmonary disease in non-smokers. *The Lancet*, 374(9691), 733-743. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(09\)61303-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)61303-9)
- SEADE. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. São Paulo: SEADE, 2024. Disponível em: www.seade.gov.br. Acesso em: 20 mar. 2025.
- SEASUD. São Caetano do Sul (SP). Secretaria da Saúde. Página da Secretaria. Disponível em: <https://www.saocaetanodosul.sp.gov.br/secretaria/2>. Acesso em: 09 abr. 2025.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2017). *Time series analysis and its applications: With R examples*. Springer.
- Silva, A. M. C. da ., Mattos, I. E., Freitas, S. R., Longo, K. M., & Hacon, S. S.. (2010). Material particulado (PM2.5) de queima de biomassa e doenças respiratórias no sul da Amazônia brasileira. *Revista Brasileira De Epidemiologia*, 13(2), 337–351. <https://doi.org/10.1590/S1415-790X2010000200015>
- Smith, M. C., & Wrobel, J. P. (2014). Epidemiology and clinical impact of major comorbidities in patients with COPD. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 9, 871-888. <https://doi.org/10.2147/COPD.S49621>
- Tribunal Superior Eleitoral - TSE. Resultados das Eleições. Brasília, DF. Disponível em: www.tse.jus.br. Acesso em: 23 mar. 2025.
- UN-Habitat. United Nations Human Settlements Programme. *New Urban Agenda*. Quito, 2016. Disponível em: <https://unhabitat.org/about-us/new-urban-agenda>. Acesso em: 23 mar. 2025.
- United Nations Environment Programme. (2019). *Air Pollution in Asia and Pacific: Science-based Solutions*. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/assessment/air-pollution-asia-and-pacific-science-based-solutions/>. Acesso em: 27 mai. 2025

- United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2025). Ground-level Ozone Basics. <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics>.
- Vormittag, E. da M. P. A. de A., Cirqueira, S. S. R., Wicher Neto, H., & Saldiva, P. H. N.. (2021). Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. *Estudos Avançados*, 35(102), 7–30. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>
- Watt, J., Tidblad, J., Kucera, V., & Hamilton, R. (2009). The effects of air pollution on cultural heritage. Springer Science & Business Media.
- Weather Spark. (2025). Clima e condições meteorológicas médias em São Caetano do Sul no ano todo. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30270/Clima-caracter%C3%ADstico-em-S%C3%A3o-Caetano-do-Sul-S%C3%A3o-Paulo-Brasil-durante-o-ano>
- Wedzicha, J. A., Miravittles, M., Hurst, J. R., Calverley, P. M., Albert, R. K., Anzueto, A., Criner, G. J., Papi, A., Rabe, K. F., Rigau, D., Sliwinski, P., Tonia, T., Vestbo, J., Wilson, K. C., & Krishnan, J. A. (2017). Management of COPD exacerbations: A European Respiratory Society/American Thoracic Society guideline. *European Respiratory Journal*, 49(3), 1600791. <https://doi.org/10.1183/13993003.00791-2016>
- World Health Organization. (2018). Ambient air pollution: Health impacts. Disponível em: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/sectoral-interventions/ambient-air-pollution/health-risks>. Acesso em: 17 set. 2025
- World Health Organization. (2020). The top 10 causes of death. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y., & Xia, G. (2020). Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101941. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101941>
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22-32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>