

CAROLINA TOSTES MARANA  
HEITOR GONÇALVES TELLES DE BRANDÃO

Impacto da qualidade do ar nos níveis de mortalidade  
de cidades do estado de São Paulo

São Paulo  
2024

CAROLINA TOSTES MARANA  
HEITOR GONÇALVES TELLES DE BRANDÃO

**Impacto da qualidade do ar nos níveis de mortalidade  
de cidades do estado de São Paulo**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obten-  
ção do Título de Engenheiro Químico.

São Paulo  
2024

CAROLINA TOSTES MARANA  
HEITOR GONÇALVES TELLES DE BRANDÃO

Impacto da qualidade do ar nos níveis de mortalidade  
de cidades do estado de São Paulo

Versão final

Trabalho apresentado à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obten-  
ção do Título de Engenheiro Químico.

Área de Concentração:

Ambiental

Orientador:

Prof. Dr. Roberto Guardani

São Paulo  
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

Marana, Carolina Tostes Marana

Impacto da qualidade do ar nos níveis de mortalidade de cidades do estado de São Paulo / C. T. M. Marana, H. G. T. B. Brandão -- São Paulo, 2024.  
49 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Poluição do ar 2.Saúde pública 3.AirQ+ software I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t. III.Brandão, Heitor Gonçalves Telles de Brandão

*Aos nossos pais, que motivam e inspiram essa caminhada, e aos nossos amigos, que a tornaram mais leve e divertida.*

# AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos aqueles que estiveram ao nosso lado durante esta jornada acadêmica, contribuindo de maneira significativa para a realização deste trabalho.

Primeiramente, expressamos nossa profunda gratidão aos nossos pais, cujo apoio inabalável e incentivo constante foram fundamentais em todos os momentos. Sem o amor, compreensão e encorajamento de vocês, esta conquista não teria sido possível. Vocês são nossas fontes inesgotáveis de inspiração.

Aos nossos amigos, agradecemos por estarem presentes compartilhando risos, desafios e momentos de descontração. Somos imensamente gratos a cada um de vocês por fazer parte da nossa vida.

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio do nosso orientador, Pr. Dr. Roberto Guardani, que, além de apoio, nos forneceu os recursos, orientações e conexões necessárias para a boa execução desse projeto. Seu apoio acadêmico e orientação foram essenciais para o nosso crescimento pessoal e profissional, e somos gratos por sua dedicação e sabedoria compartilhada.

Ao Almir Oliveira da Silva e à Maria Lúcia Guardani, somos gratos pelo auxílio para a realização deste trabalho, fornecendo dados, orientando a análise e nos instruindo a respeito da qualidade do ar. Sua colaboração foi fundamental para o sucesso deste projeto acadêmico. Muito obrigado pelo apoio e orientação ao longo deste processo.

À CETESB, pelo valioso fornecimento dos dados utilizados nesta análise, expressamos nosso reconhecimento. Sem o acesso a essas informações, nenhuma das análises contidas nesse trabalho teriam sido possíveis. Além disso, como cidadãos do estado de São Paulo, agradecemos ao monitoramento e ações empregadas em prol da melhoria da qualidade do ar que respiramos.

Por fim, gostaríamos de agradecer à CAPES, à École Centrale Méditerranée e à École Nationale Supérieure en Génie des Technologies Industrielles por fornecerem bolsas de estudo que possibilitaram a nossa participação em um enriquecedor programa de duplo diploma. Essa experiência foi crucial para ampliar nossos horizontes acadêmicos, profissionais e culturais, agregando valor ao nosso percurso acadêmico, enriquecendo nossa formação e inspirando o presente trabalho.

A todos os mencionados e a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, nosso mais profundo agradecimento. Vocês foram parte fundamental deste caminho, e levamos cada ensinamento, apoio e memória conosco para os desafios que ainda estão por vir. Muito obrigado.

*“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”*

*(Isaac Newton)*

## RESUMO

Este estudo examina como a poluição do ar afeta a taxa de mortalidade em cidades do estado de São Paulo ao longo dos últimos quatro anos. A qualidade do ar nessas cidades é influenciada por fatores como localização geográfica, atividades econômicas e políticas ambientais, resultando em diferentes níveis de poluição. Utilizando o modelo estatístico AirQ+ da Organização mundial da saúde, estabeleceu-se uma relação entre poluição do ar e saúde pública. As análises indicam que cidades como Campinas, Paulínia e Rio Claro possuem padrões de qualidade do ar semelhantes, com impactos significativos de curto prazo da exposição ao ozônio e partículas provenientes de indústrias locais. Por outro lado, cidades como Santa Gertrudes, Santos e São José do Rio Preto seguem uma tendência diferente, com maior influência do dióxido de nitrogênio em exposições de curto prazo e material particulado em exposições de longo prazo, devido às suas atividades econômicas específicas.

**Palavras-Chave** – poluição do ar; saúde pública; AirQ+ software.

# ABSTRACT

This study examines how air pollution affects mortality rates in cities in the state of São Paulo over the last four years. Air quality in these cities is influenced by factors such as geographical location, economic activities and environmental policies, resulting in different levels of pollution. Using the World Health Organization's AirQ+ statistical model, a relationship was established between air pollution and public health. The analyses indicate that cities such as Campinas, Paulínia and Rio Claro have similar air quality standards, with significant short-term impacts from exposure to ozone and particles from local industries. On the other hand, cities such as Santa Gertrudes, Santos and São José do Rio Preto follow a different trend, with a greater influence of nitrogen dioxide in short-term exposures and particulate matter in long-term exposures, due to their specific economic activities.

**Keywords** – air pollutants; public health; AirQ+ software

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Pirâmide dos efeitos da poluição atmosférica na saúde humana . . . . .	p. 2
2.2	Comparação de tamanhos de partículas de material particulado . . . . .	p. 4
2.3	Transformações químicas de óxidos de nitrogênio atmosféricos . . . . .	p. 6
2.4	Localização das estações de mensuração da qualidade do ar (2022) . . . . .	p. 7
4.1	Fluxograma de processamento dos dados para a realização da análise estatística do estudo . . . . .	p. 12
4.2	Fluxograma de processamento dos dados para os poluentes PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> e NO <sub>2</sub> . . . . .	p. 14
4.3	Fluxograma de processamento dos dados para o poluente O <sub>3</sub> . . . . .	p. 15
5.1	Óbitos associados à exposição de curto prazo ao poluente PM <sub>2.5</sub> de 2019 à 2022 . . . . .	p. 19
5.2	Óbitos associados à exposição de longo prazo ao poluente PM <sub>2.5</sub> de 2019 à 2022 . . . . .	p. 20
5.3	Óbitos associados à exposição de curto prazo ao poluente PM <sub>10</sub> de 2019 à 2022 . . . . .	p. 21
5.4	Óbitos associados à exposição de longo prazo ao poluente PM <sub>10</sub> de 2019 à 2022 . . . . .	p. 22
5.5	Óbitos associados à exposição de curto prazo ao poluente O <sub>3</sub> de 2019 à 2022 . . . . .	p. 23
5.6	Óbitos associados à exposição de longo prazo ao poluente O <sub>3</sub> de 2019 à 2022 . . . . .	p. 23
5.7	Óbitos associados à exposição de curto prazo ao poluente NO <sub>2</sub> de 2019 à 2022 . . . . .	p. 25
5.8	Óbitos associados à exposição de longo prazo ao poluente NO <sub>2</sub> de 2019 à 2022 . . . . .	p. 25

5.9	Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Campinas de 2019 a 2022 . . . . .	p. 27
5.10	Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Campinas de 2019 a 2022 . . . . .	p. 27
5.11	Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Paulínia de 2019 a 2022 . . . . .	p. 28
5.12	Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Paulínia de 2019 a 2022 . . . . .	p. 28
5.13	Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Rio Claro de 2019 a 2022 . . . . .	p. 29
5.14	Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Rio Claro de 2019 a 2022 . . . . .	p. 29
5.15	Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Santa Gertrudes de 2019 a 2022 . . . . .	p. 30
5.16	Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Santa Gertrudes de 2019 a 2022 . . . . .	p. 30
5.17	Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Santos de 2019 a 2022 . . . . .	p. 31
5.18	Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Santos de 2019 a 2022 . . . . .	p. 31
5.19	Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em São José do Rio Preto de 2019 a 2022 . . . . .	p. 32
5.20	Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em São José do Rio Preto de 2019 a 2022 . . . . .	p. 32

## LISTA DE TABELAS

2.1	Penetrabilidade em relação ao tamanho do material particulado . . . . .	p. 3
2.2	Tipos e tamanhos de materiais particulados (PM) . . . . .	p. 4
2.3	Dados populacionais, econômicos e sociais das cidades do estudo (2022)	p. 8
4.1	Métodos de medição dos parâmetros . . . . .	p. 13
4.2	Fontes de dados do estudo . . . . .	p. 13
5.1	Poluente com maior número de óbitos associado à exposição a curto e a longo prazo por cidade . . . . .	p. 33
A.1	Classificação das cidades em que analisadores (MP <sub>2.5</sub> , MP <sub>10</sub> , NO <sub>2</sub> e O <sub>3</sub> ) da CETESB estão instalados e seus respectivos tipos . . . . .	p. 36
A.2	Série temporal de concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do poluente MP <sub>2.5</sub> (sem representatividade) . . . . .	p. 37
A.3	Série temporal de concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do poluente MP <sub>2.5</sub> (com representatividade) . . . . .	p. 37
A.4	Série temporal de concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do poluente MP <sub>10</sub> . . . . .	p. 37
A.5	Série temporal de concentração SOMA 35 ( <i>ppb · dia</i> ) do poluente O <sub>3</sub> . . . . .	p. 38
A.6	Série temporal da população residente estimada . . . . .	p. 38
A.7	Área territorial dos municípios . . . . .	p. 38
A.8	Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Campinas	p. 39
A.9	Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Paulínia	p. 39
A.10	Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Rio Claro	p. 40
A.11	Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Santa Gertrudes . . . . .	p. 40
A.12	Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Santos . . . . .	p. 41
A.13	Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de São José do Rio Preto . . . . .	p. 41

B.1	Resultados da simulação com o poluente $PM_{2.5}$ . . . . .	p. 43
B.2	Resultados da simulação com o poluente $PM_{10}$ . . . . .	p. 44
B.3	Resultados da simulação com o poluente $O_3$ . . . . .	p. 45
B.4	Resultados da simulação com o poluente $NO_2$ . . . . .	p. 46

## LISTA DE SIGLAS

CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
OMS	Organização Mundial da Saúde
PIB	Produto Interno Bruto

## LISTA DE SÍMBOLOS

$AP$	Attributable proportion (fração atribuível)	[%]
$A_8^d$	Média diária de concentração de 8 horas em um dia $d$	$[\mu g/m^3]$
$I$	Frequência basal	
$IE$	Taxa do evento	[%]
$N$	Número de dias em um determinado ano	[dia]
$NE$	Número de casos	
$N_{POP}$	Tamanho da população	
$P(c)$	População exposta	
$PM_{2.5}$	Material particulado 2.5	
$PM_{10}$	Material particulado 10	
$RR$	Risco relativo	[%]
$SOMO35$	Sum of Ozone Means Over 35 ppb (Soma das médias de ozônio superiores a 35 ppb)	$[ppb \cdot dia]$

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	p. 1
<b>2</b>	<b>Revisão de Literatura</b>	p. 2
2.1	Poluentes atmosféricos . . . . .	p. 2
2.1.1	PM <sub>2.5</sub> e PM <sub>10</sub> . . . . .	p. 4
2.1.2	Ozônio . . . . .	p. 5
2.1.3	Óxidos de Nitrogênio . . . . .	p. 6
2.2	Histórico das cidades do estudo . . . . .	p. 6
<b>3</b>	<b>Objetivo</b>	p. 10
3.1	Objetivo geral . . . . .	p. 10
3.2	Objetivos específicos . . . . .	p. 10
<b>4</b>	<b>Métodos</b>	p. 11
4.1	Cidades eleitas para o estudo . . . . .	p. 11
4.2	Análise Estatística . . . . .	p. 12
4.2.1	Metodologia de monitoramento . . . . .	p. 12
4.2.2	Tratamento da fonte de dados . . . . .	p. 13
4.2.2.1	PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , NO <sub>2</sub> . . . . .	p. 14
4.2.2.2	Ozônio . . . . .	p. 14
4.2.3	Análise com <i>AirQ+</i> . . . . .	p. 16
<b>5</b>	<b>Discussão e Resultados</b>	p. 18
5.1	Número de óbitos anual associado à cada poluente . . . . .	p. 18
5.1.1	PM <sub>2.5</sub> . . . . .	p. 18

5.1.2	PM <sub>10</sub> . . . . .	p. 20
5.1.3	O <sub>3</sub> . . . . .	p. 22
5.1.4	NO <sub>2</sub> . . . . .	p. 24
5.2	Número de óbitos anual associado à poluição do ar por cidade . . . . .	p. 26
5.3	Impacto dos poluentes a longo e a curto prazo . . . . .	p. 33
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	p. 34
	<b>Apêndice A – Tabelas fonte das simulações</b>	p. 35
	<b>Apêndice B – Resultados das simulações</b>	p. 42
	<b>Referências</b>	p. 47

# 1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar desempenha um papel crucial na saúde humana e está diretamente associada a uma menor incidência de doenças respiratórias. Dado esse contexto e os diferentes perfis de poluição do ar em diversas cidades, este trabalho propõe-se a investigar o número de óbitos associados à exposição de curto e longo prazo à poluição do ar em algumas cidades do interior e do litoral do estado de São Paulo nos últimos 4 anos.

O perfil de poluição atmosférica de cada cidade depende da sua localização geográfica, da sua atividade econômica e das suas políticas de controle ambiental. Tal perfil é composto por uma combinação de vários tipos de poluentes, como material particulado, ozônio e dióxido de nitrogênio, e pode ser vinculado aos índices de mortalidade populacional. Utilizando o modelo estatístico do software AirQ+, desenvolvido pela Organização Mundial de Saúde (OMS), é possível estabelecer esse vínculo entre saúde pública e qualidade do ar.

Por meio desse estudo, espera-se aumentar a conscientização sobre a gravidade da poluição do ar no bem-estar humano e fornecer subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem o desenvolvimento sustentável das cidades e de estratégias eficazes de proteção da saúde da população.

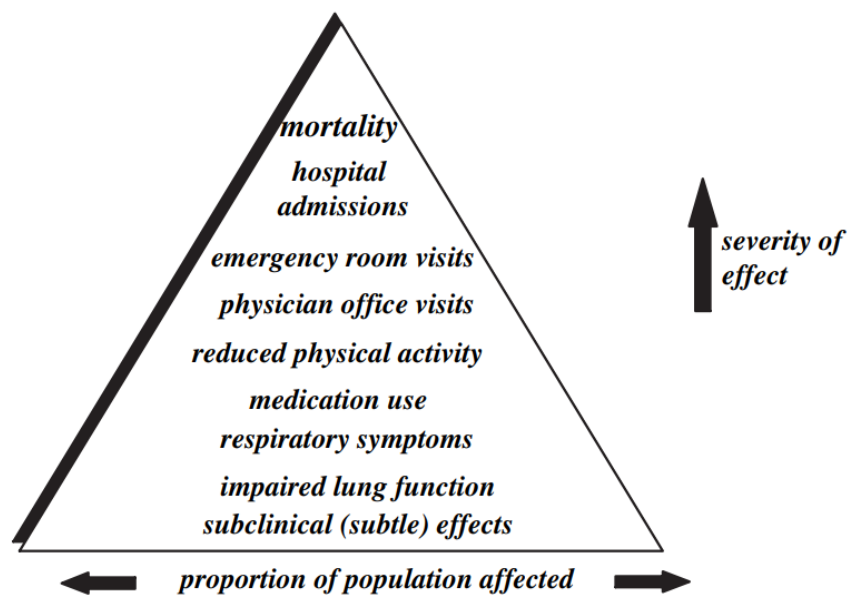
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A poluição atmosférica é resultante da presença de diversos poluentes, como materiais particulados ( $MP_{2.5}$ ,  $MP_{10}$ ), ozônio troposférico ( $O_3$ ), óxidos de nitrogênio ( $NO_2$ ), entre outros como o monóxido de carbono (CO) e óxidos de enxofre ( $SO_x$ ), e representa uma das maiores preocupações para a saúde pública e o meio ambiente. A Organização Mundial de Saúde (OMS) identifica esses seis principais poluentes, cada um com origens e impactos específicos, mas todos contribuindo para uma série de problemas adversos à saúde humana. (MANISALIDIS et al., 2020)

Ainda, numerosos estudos epidemiológicos acharam uma relação entre efeitos de saúde adversos e a poluição atmosférica, vão de pequenos sinais clínicos a mortes prematuras, como aponta a figura 2.1:

Figura 2.1: Pirâmide dos efeitos da poluição atmosférica na saúde humana



Fonte: Extraído de (SAMET; KREWSKI, 2007).

A poluição de materiais particulados consiste numa mistura de partículas sólidas presentes no ar. Elas podem ter diversas fontes, como escapamentos veiculares, processos industriais e fontes naturais, como incêndios florestais. A poluição de materiais particulados está fortemente associada a problemas respiratórios e doenças cardiovasculares, especialmente em grupos vulneráveis como crianças, idosos e pessoas com condições de saúde pré-existentes. Como as partículas variam em tamanho, os poluentes desse grupo são categorizados de acordo com o seu diâmetro, havendo grupos que são mais ou menos prejudiciais à saúde humana pela sua penetrabilidade, como mostra a tabela 2.1. (WILSON; SUH, 1997)

Tabela 2.1: Penetrabilidade em relação ao tamanho do material particulado

<b>Tamanho da partícula</b>	<b>Penetrabilidade no sistema respiratório humano</b>
$> 11$ [ $\mu m$ ]	Passagem para as narinas e trato respiratório superior
$7 - 11$ [ $\mu m$ ]	Passagem para a cavidade nasal
$4.7 - 7$ [ $\mu m$ ]	Passagem para a laringe
$3.3 - 4.7$ [ $\mu m$ ]	Passagem para a área tráqueo-brônquica
$2.1 - 3.3$ [ $\mu m$ ]	Passagem para a área brônquica secundária
$1.1 - 2.1$ [ $\mu m$ ]	Passagem para a área brônquica terminal
$0.65 - 1.1$ [ $\mu m$ ]	Penetrabilidade aos bronquíolos
$0.43 - 0.65$ [ $\mu m$ ]	Penetrabilidade alveolar

Fonte: Extraído e traduzido de (MANISALIDIS et al., 2020)

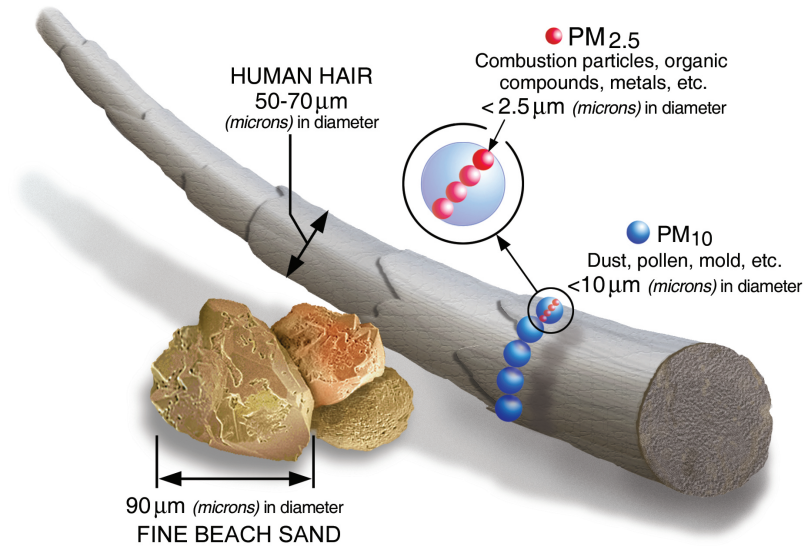
O ozônio, molécula naturalmente presente na estratosfera, torna-se um poluente quando encontrado na troposfera. Quando nas camadas mais altas da atmosfera, é responsável pela camada protetora de raios UV provenientes da radiação solar, defletindo esses raios e protegendo a superfície terrestre da radiação danosa. Entretanto, quando presente em camadas mais baixas da atmosfera, como a troposfera, causa diversos efeitos adversos à saúde respiratória humana, agravando problemas respiratórios como a asma e contribuindo para o estabelecimento de outras doenças respiratórias. O poluente é formado quando os outros poluentes nitrogenados e compostos orgânicos voláteis emitidos por veículos, processos industriais e outras fontes reagem com a luz solar. (NUVOLONE et al., 2017)

Óxidos de nitrogênio são produzidos por processos de combustão, como os que ocorrem em veículos e usinas de energia. Além de contribuírem para a formação de ozônio em níveis mais baixos da atmosfera, a sua exposição prolongada pode resultar em problemas respiratórios e outros problemas de saúde. (BONINGARI; SMIRNIOTIS, 2016)

### 2.1.1 PM<sub>2.5</sub> E PM<sub>10</sub>

Materiais particulados são comumente formados na atmosfera como resultado de reações químicas entre diferentes poluentes, sendo o PM<sub>2.5</sub> aquele que oferece maior risco ao bem-estar humano (KELISHADI; POURSAFA, 2010).

Figura 2.2: Comparação de tamanhos de partículas de material particulado



Fonte: Extraído de (United States Environmental Protection Agency, 2023).

Tanto PM<sub>2.5</sub> como PM<sub>10</sub> podem ser divididos em quatro categorias principais, dependendo do seu tamanho e do seu tipo, como aponta a tabela 2.2:

Tabela 2.2: Tipos e tamanhos de materiais particulados (PM)

Tipo		Diâmetro do PM
Contaminantes particulados	<i>Smog</i>	0.01 - 1
	Fuligem	0.01 - 0.8
	Fumaça de tabaco	0.01 - 1
	Cinzas	1 - 100
	Poeira de cimento	8 - 100
Contaminantes biológicos	Bactérias e esporos bacterianos	0.7 - 10
	Vírus	0.01 - 1
	Fungos e bolores	2 - 12
	Alérgenos (cachorros, gatos, pólens, poeira doméstica)	0.1 - 100
Tipos de poeira	Poeira atmosférica	0.01 - 1
	Poeira pesada	100 - 1000
	Poeira assentada	1 - 100
Gazes	Diferentes contaminantes gasosos	0.0001 - 0.01

Fonte: Extraído e traduzido de (MANISALIDIS et al., 2020)

Estudos epidemiológicos sobre os efeitos à saúde causados pela exposição a curto e longo prazo ao PM<sub>2.5</sub> descobriram a maior causalidade de nasofaringite aguda. Quando

considerado apenas os efeitos a longo prazo, foram relatados um aumento no número de doenças cardiovasculares e mortalidade infantil. (ZHANG et al., 2019)

Além disso, as meias-vidas dos materiais particulados na atmosfera são estendidas devido às suas baixas dimensões. Com isso, permanecem suspensos na atmosfera por mais tempo e a sua difusão espacial na atmosfera é facilitada. Dessa forma, pessoas que não se encontram no foco das emissões de material particulado ainda assim podem ser atingidas. (WILSON; SUH, 1997)

### 2.1.2 OZÔNIO

O ozônio é um gás formado a partir do oxigênio, com alto poder oxidativo. Na atmosfera, é mais comumente achado na camada da estratosfera, em que constitui a camada de ozônio. Quando encontrado na troposfera, a camada mais próxima da superfície, constitui um poluente nocivo à saúde respiratória humana. O ozônio pode ser encontrado na troposfera a partir de uma reação com dióxido de nitrogênio em presença de luz solar, como mostra a equação 2.1: (NUSSBAUMER et al., 2022)



Essa reação faz parte de uma cadeia reacional que ocorre na troposfera na presença de compostos  $\text{NO}_2$ , sendo portanto bastante suscetível à variações no equilíbrio químico (NUSSBAUMER et al., 2022). Além disso, o ozônio pode viajar grandes distâncias do seu ponto de emissão inicial com as massas de ar, o que contribui para a sua difusividade. Estudos apontam que, durante períodos mais quentes do ano, pela maior incidência solar, há maior formação de ozônio na troposfera e maior mortalidade por doenças respiratórias e cardíacas. (GRYPARIS et al., 2004)

Os danos do ozônio como poluente não se restringem à saúde humana, mas também às plantas. É comprovado que altas concentrações de ozônio reduzem a assimilação de carbono (FARES et al., 2013) e, conseqüentemente, o crescimento de plantas. Além disso, afeta negativamente a microflora botânica pelas suas características antimicrobiais. (EMBERSON et al., 2018)

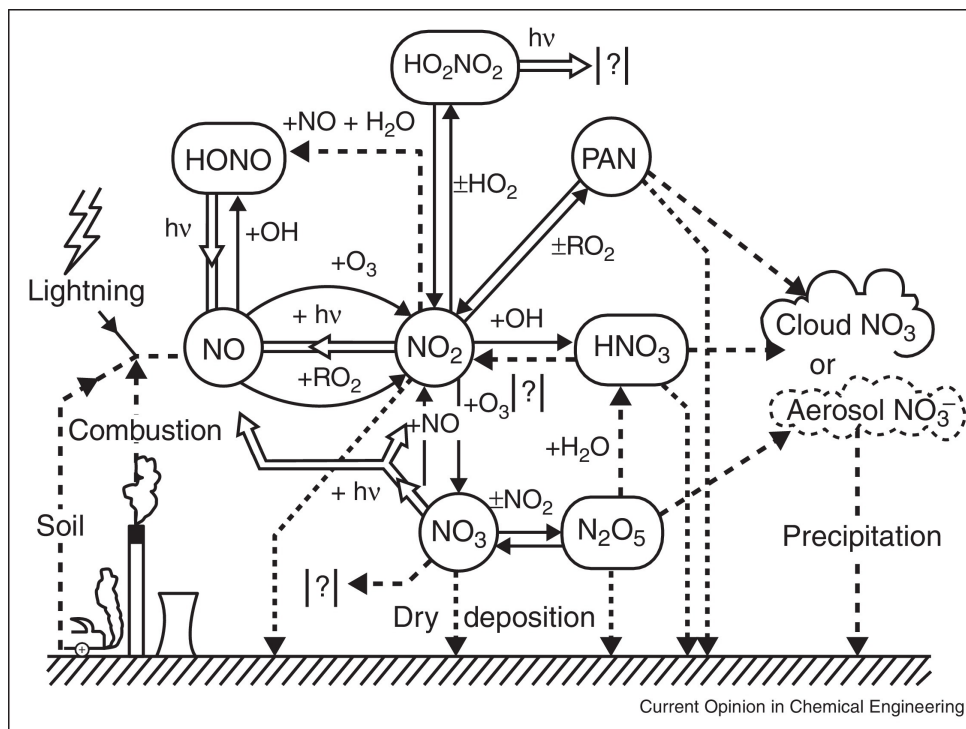
### 2.1.3 ÓXIDOS DE NITROGÊNIO

Emitidos a partir de motores de carros, o dióxido de nitrogênio é irritante ao sistema respiratório e pode penetrar profundamente nos pulmões. Isso induz o estabelecimento de doenças respiratórias, tosses, broncoespasmos e edemas pulmonares, quando inalado em altas doses. Reporta-se ainda que, em casos de exposição prolongada a altas concentrações de  $\text{NO}_2$ , doenças pulmonares crônicas são mais propícias. (MANISALIDIS et al., 2020)

Além disso, outros óxidos de nitrogênio, como  $\text{NO}$  ou  $\text{N}_2\text{O}$ , também apresentam efeitos adversos ao organismo. (BONINGARI; SMIRNIOTIS, 2016)

Do ponto de vista químico, os óxidos de nitrogênio fazem parte de um ciclo intrincado de reações, que é exemplificado na figura 2.3:

Figura 2.3: Transformações químicas de óxidos de nitrogênio atmosféricos



Fonte: Extraído de (BONINGARI; SMIRNIOTIS, 2016).

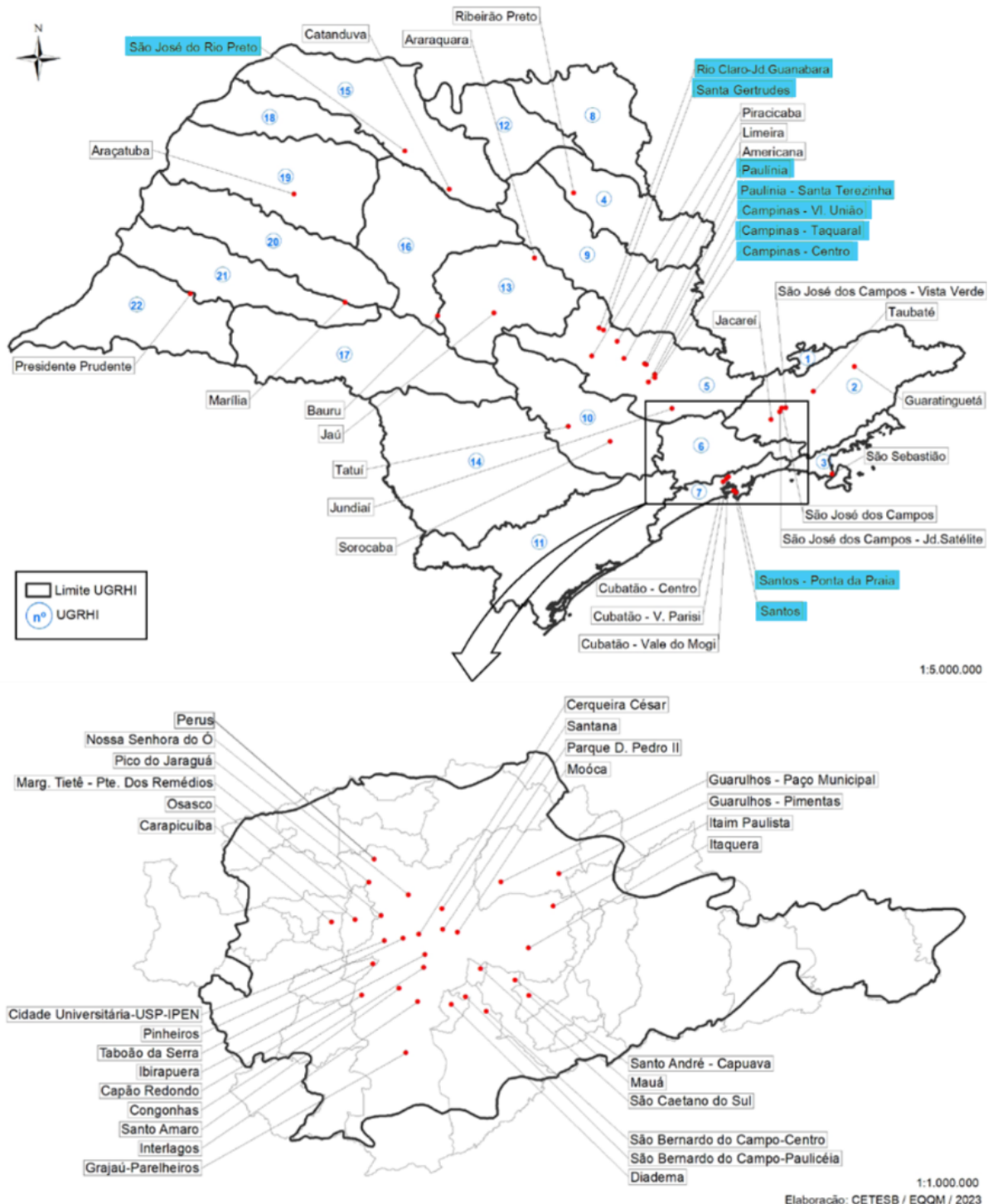
A presença de óxidos de nitrogênio na troposfera impactam, ainda, na formação de ozônio, como discutido na seção 2.1.2 deste estudo.

## 2.2 HISTÓRICO DAS CIDADES DO ESTUDO

Neste estudo, seis cidades do estado de São Paulo serão abordadas. São elas: Campinas, Paulínia, Rio Claro, Santa Gertrudes, Santos e São José do Rio Preto. São cidades

que possuem características urbanizadas, com indústrias que, apesar de impulsionarem a economia local, também criam desafios ambientais e sanitários. Essas cidades ficam localizadas no interior e litoral do estado, como aponta a figura 2.4. Nelas, ainda, estão instaladas estações de mensuração da qualidade do ar da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), em que amostras são coletadas e analisadas.

Figura 2.4: Localização das estações de mensuração da qualidade do ar (2022)



Fonte: Extraído de (CETESB, 2022).

As cidades apresentam, ainda, diferentes características sociais, econômicas, sanitárias e urbanísticas, como aponta a tabela 2.3:

Tabela 2.3: Dados populacionais, econômicos e sociais das cidades do estudo (2022)

	<b>População</b> <i>habitantes</i>	<b>Área territorial</b> <i>km<sup>2</sup></i>	<b>Densidade demográfica</b> <i>pessoas/km<sup>2</sup></i>	<b>PIB per capita</b> <i>R\$/habitante</i>
Campinas	1.139.047	794,5710	1.433,54	59.634,21
Paulínia	110.537	138,7770	796,51	457.517,7
Rio Claro	201.418	498,4220	404,11	63.209,08
Santa Gertrudes	23.611	98,2910	240,22	139.885,74
Santos	418.608	281,0330	1.489,53	55.508,46
São José do Rio Preto	480.439	431,9440	1.112,27	44.679,93

	<b>Mortalidade infantil</b> <i>óbitos a cada mil nascidos vivos</i>	<b>Internações por diarreia</b> <i>internações por 100 mil habitantes</i>	<b>Área urbanizada</b> <i>km<sup>2</sup></i>	<b>Arborização de vias públicas</b> <i>%</i>
Campinas	10,12	11,1	245,14	87,5
Paulínia	14,8	7,2	39,5	95,6
Rio Claro	11,2	5,5	48,25	81,6
Santa Gertrudes	-	-	7,14	95,7
Santos	7,99	2,9	39,05	87,3
São José do Rio Preto	9,79	22,1	124,79	96,5

Fonte: Dados extraídos de (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022)

Campinas, por exemplo, é reconhecida como um importante polo tecnológico e industrial, com uma forte presença na indústria automobilística e de alta tecnologia. No entanto, esse desenvolvimento industrial também trouxe consigo preocupações ambientais, como a poluição do ar devido às emissões industriais e o risco de contaminação do solo devido aos resíduos industriais, especialmente da indústria química e farmacêutica. (PLURIS, 2020)

Paulínia, por sua vez, emergiu como um centro petroquímico vital devido à descoberta de petróleo na região. A presença de refinarias de petróleo e indústrias petroquímicas trouxe desenvolvimento econômico, mas também desafios ambientais significativos, incluindo a poluição atmosférica causada pelas operações industriais e o risco de vazamentos de produtos químicos tóxicos. (PLURIS, 2020)

Santa Gertrudes, conhecida como a *Cidade Cerâmica*, tem uma história de produção cerâmica que remonta ao século XX. Enquanto a indústria cerâmica trouxe prosperidade para a região, também trouxe preocupações ambientais, como emissões de poluentes atmosféricos e contaminação do solo e da água devido aos resíduos de produção. (VIEIRA, 2022)

Em Rio Claro, as indústrias têxteis e de papel têm sido tradicionalmente importantes para a economia local. No entanto, essas cidades também enfrentam desafios ambientais, como a poluição da água devido aos efluentes industriais, que podem conter corantes e produtos químicos tóxicos, além do desmatamento associado à indústria de papel e celulose. (SAMPAIO, 1987)

São José do Rio Preto é dominada pela agroindústria, com uma forte produção de cana-de-açúcar, etanol e açúcar. Enquanto isso impulsiona a economia local, também traz questões ambientais, incluindo desmatamento, uso excessivo de agrotóxicos e poluição do ar devido à queima da cana-de-açúcar durante a colheita. (FRANCISCO, 2013)

Santos, uma cidade portuária histórica e vital para o comércio brasileiro, sofre com problemáticas ambientais decorrentes de suas atividades portuárias e industriais. Isso inclui poluição marinha devido a vazamentos de óleo e produtos químicos, bem como erosão costeira e impactos na biodiversidade devido à dragagem e expansão portuária. (FILHO; RIGHI, 2020)

## 3 OBJETIVO

### 3.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo avaliar o número de óbitos associadas à poluição do ar em diferentes cidades do interior de São Paulo ao longo dos últimos anos que podem ser atribuídas à exposição de longo e curto prazo a um grupo de poluentes específico cujas concentrações excedem o limite da diretriz de qualidade do ar da OMS.

### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Aplicar o modelo estatístico do AirQ+ para a predição de óbitos associados pela poluição atmosférica dos poluentes  $MP_{2.5}$ ,  $MP_{10}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  nas cidades estudadas;
2. Determinar os poluentes que mais contribuem para os óbitos a longo e a curto prazo em nas cidades selecionadas;
3. Comparar o número de óbitos associados aos poluentes entre as diferentes cidades do estudo, levando em consideração os poluentes associados.

## 4 MÉTODOS

O tipo de pesquisa utilizada no presente trabalho foi descritiva e exploratória com abordagem quantitativa em relação aos objetivos.

Assim sendo, a metodologia envolve a determinação das cidades do estudo e a construção de análises estatísticas dos dados de concentração de poluentes no ar em proximidade às estações analisadoras da CETESB no estado de São Paulo. Para a realização das análises, o software AirQ+ foi utilizado.

Em primeiro passo, os dados compartilhados foram tratados e organizados para serem inseridos no software estatístico. Diferentes simulações para cada poluente foram conduzidas e os seus resultados, analisados com o uso de tabelas e gráficos.

A partir das tabelas e dos gráficos criados, foi possível obter conclusões sobre o estudo e realizar a estimativa de mortes ligada aos poluentes das cidades analisadas.

### 4.1 CIDADES ELEITAS PARA O ESTUDO

A escolha das cidades para o estudo baseou-se em dois fatores principais:

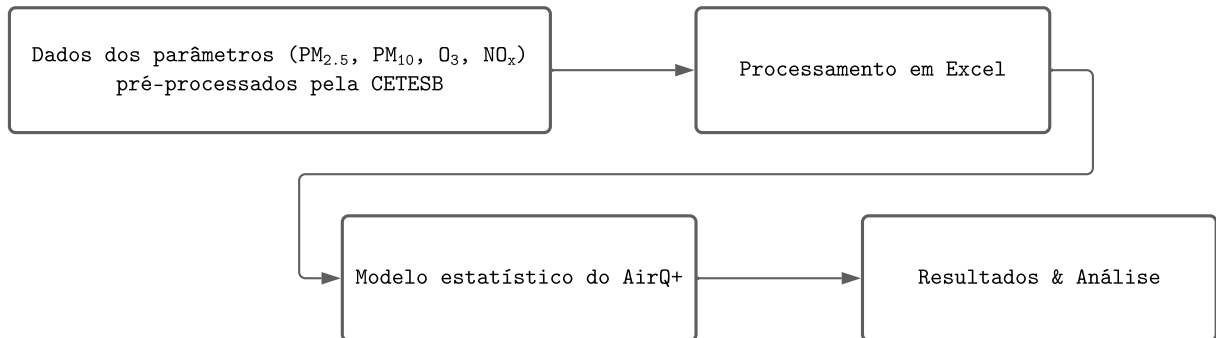
1. Presença de estações da CETESB da categoria *Urbana* e *Bairro* que fornecessem medidas dos poluentes  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$
2. Contexto histórico-econômico da cidade

Esses dois critérios foram levados em consideração uma vez que as análises precisam de dados para serem realizadas e que, como as cidades eleitas (Campinas, Paulínia, Rio Claro, Santa Gertrudes, Santos e São José do Rio Preto) possuem diferentes contextos históricos e econômicos, diferentes poluentes estão presentes em maiores e menores concentrações.

## 4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a realização da análise estatística do estudo, o processo exemplificado na figura 4.1 foi aplicado:

Figura 4.1: Fluxograma de processamento dos dados para a realização da análise estatística do estudo



Fonte: Elaboração própria (2024)

Assim sendo, os dados pré-processados obtidos pela CETESB foram tratados pelo grupo, de modo a obter médias e agregações que correspondessem àquelas necessárias para a utilização do modelo do AirQ+.

O software AirQ+ é uma ferramenta utilizada para a avaliação de riscos de saúde decorrentes da poluição atmosférica aos quais uma população está exposta. O software analisa o impacto da poluição a curto e longo prazo respectivamente com base em estimativas de risco de estudos de séries temporais e estudos de corte aliado a tabelas de vida. (GENEVA: WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE, 2021)

Para o modelo estatístico desse software, o "curto prazo" refere-se ao impacto na saúde nas próximas 24 horas do contato considerável com o poluente, enquanto que o "longo prazo" indica os efeitos na saúde humana depois de 10 anos do contato diário com o poluente (COPENHAGEN: WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE, 2020).

### 4.2.1 METODOLOGIA DE MONITORAMENTO

Os métodos utilizados para o monitoramento dos poluentes deste estudo são dispostos na tabela 4.1. As amostras são coletadas a intervalos de cinco segundos, acumulando os dados na forma de média horária. As amostras coletadas são posteriormente analisadas no Setor de Amostragem e Análise do Ar da CETESB. (CETESB, 2022)

Por fim, os dados também são sujeitos à representatividade espacial das estações. Os resultados do monitoramento devem representar as concentrações do poluente de interesse

numa escala espacial compatível com os objetivos do monitoramento. (CETESB, 2022) As escalas de representatividade consideradas nesse estudo estabelecidas no Decreto Estadual n° 59.113/2013 são as seguintes:

- Escala de bairro: relativa à representatividade espacial de áreas de bairros urbanos com atividade uniforme e dimensões entre 501 e 4.000 metros;
- Escala urbana: relativa à representatividade espacial de cidades ou regiões metropolitanas, da ordem de 4 a 50 km.

Tabela 4.1: Métodos de medição dos parâmetros

Rede	Parâmetro	Método
Rede Automática	Partículas inaláveis finas – MP <sub>2.5</sub>	Radiação Beta
	Partículas inaláveis – MP <sub>10</sub>	Radiação Beta
	Ozônio	Ultravioleta
	Óxidos de Nitrogênio	Quimiluminescência
Rede Manual	Partículas inaláveis finas – MP <sub>2.5</sub>	Gravimétrico/Impactação virtual (dicotômico)
	Partículas inaláveis – MP <sub>10</sub>	Gravimétrico/Impactação e ciclone Gravimétrico/Amostrador de grandes volumes acoplado a um separador inercial Gravimétrico/Impactação

Fonte: Extraído e adaptado de (CETESB, 2022).

## 4.2.2 TRATAMENTO DA FONTE DE DADOS

Para a realização do estudo quantitativo, foi necessário coletar todos os dados usados como parâmetros do modelo estatístico proposto pelo *AirQ+*, sendo eles: Concentração média dos poluentes ao longo de cada ano do estudo – PM<sub>2.5</sub> ( $\mu g/m^3$ ), PM<sub>10</sub> ( $\mu g/m^3$ ), NO<sub>2</sub> ( $\mu g/m^3$ ) e O<sub>3</sub> ( $ppb \cdot dia$ ) –, população, área e mortalidade – incidência de casos a cada 100.000 pessoas por ano – da cidade em questão.

Os dados utilizados no estudo foram obtidos a partir das seguintes fontes:

Tabela 4.2: Fontes de dados do estudo

Parâmetro	Unidade	Fonte
Concentração média de PM <sub>2.5</sub>	$\mu g/m^3$	CETESB
Concentração média de PM <sub>10</sub>	$\mu g/m^3$	CETESB
Concentração média de NO <sub>2</sub>	$\mu g/m^3$	CETESB
Concentração média de O <sub>3</sub>	$\mu g/m^3$	CETESB
População	-	DataSUS
Área	$km^2$	IBGE
Mortalidade	óbitos por ano	DataSUS

Fonte: Elaboração própria (2024)

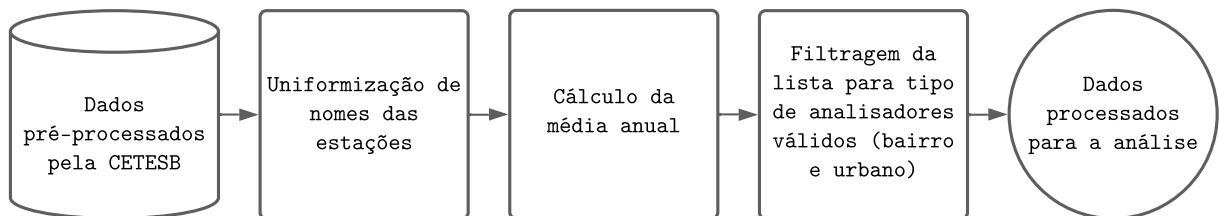
Os dados utilizados nas análises presentes neste estudo foram obtidos à partir de estações de mensuração da qualidade do ar instaladas pela CETESB em diferentes cidades do estado de São Paulo. Esses dados, que são originalmente coletados em sua forma bruta, são limpos, processados, selecionados e analisados nos relatórios de qualidade do ar publicados pela mesma instituição.

#### 4.2.2.1 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>

Para a execução deste trabalho, os dados processados pela CETESB foram compartilhados com o grupo a partir de arquivos *.csv*, sendo posteriormente tratados pelo grupo com o software *Microsoft Excel* para que análises exploratórias iniciais fossem conduzidas e organizadas, com a finalidade de uniformizar os dados que seriam inseridos no software *AirQ+* para a realização da análise estatística de mortalidade das cidades eleitas.

Os poluentes PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> e NO<sub>2</sub> não foram extensamente processados a partir do arquivo original, sendo eles apenas organizados para a análise conduzida no *AirQ+*, como indica a figura 4.2.

Figura 4.2: Fluxograma de processamento dos dados para os poluentes PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> e NO<sub>2</sub>



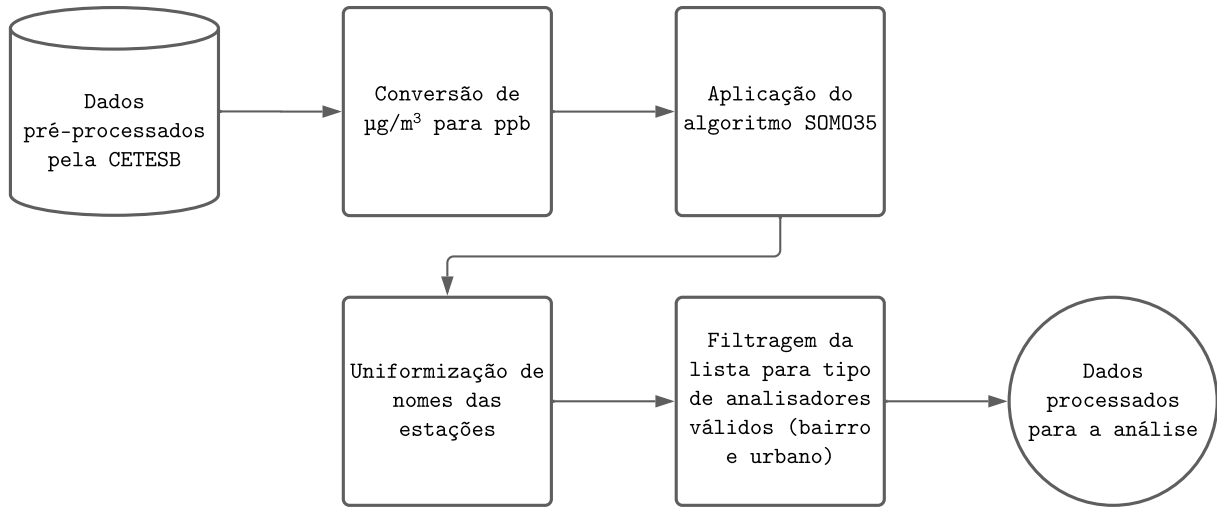
Fonte: Elaboração própria (2024)

Desse modo, a média anual da concentração dos poluentes calculada pela CETESB em cada estação foi utilizada e as estações consideradas para o estudo foram classificadas de acordo com o seu tipo. Apenas as estações classificadas como *Urbana* e *Bairro* foram consideradas neste estudo.

#### 4.2.2.2 OZÔNIO

Para o ozônio, entretanto, maiores manipulações foram necessárias. Como o software *AirQ+* utiliza a metodologia SOMO35 para fazer a estimativa de mortes à partir da contaminação de ozônio, foi necessário processar os dados da maneira exemplificada na figura 4.3.

A soma das médias de ozônio superiores a 35 ppb (*Sum of Ozone Means Over 35*

Figura 4.3: Fluxograma de processamento dos dados para o poluente O<sub>3</sub>

Fonte: Elaboração própria (2024)

*ppb* – SOMO35) é um indicador para a avaliação do impacto na saúde recomendado pela OMS. É definido pela soma anual dos máximos diários da média de 8 horas consecutivas acima de 35 *ppb* e, para cada dia, o máximo da média diária de 8 horas para o ozônio é selecionado e os valores superiores a 35 *ppb* são somados ao longo de todo o ano.

O cálculo é definido pela expressão 4.2 (NAGHAN et al., 2022):

$$SOMO35_{uncorrected} = \sum_{d=1}^{d=N_y} \max(A_8^d - 35, 0.0) [ppb \cdot dia] \quad (4.1)$$

$$SOMO35 = SOMO35_{uncorrected} \cdot \frac{N_y}{N_{valid}} \quad (4.2)$$

em que  $A_8^d$  denota o valor máximo da média diária de 8 horas de ozônio em um dia  $d$ , durante um ano com  $N_y$  dias (podendo ser igual a 365 ou 366 dias, para anos bissextos). A função  $\max$  garante que apenas os valores de  $A_8^d$  que excedam 35 *ppb* sejam incluídas no cálculo.

Inicialmente, foi necessário aplicar um fator de conversão 2 para converter os dados de  $\mu/m^3$  para *ppb*, como indicado no manual do *AirQ+* (COPENHAGEN: WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE, 2020). Dessa forma, com o cálculo SOMO35, a concentração anual de ozônio é medida em *ppb · dia*. O cálculo foi aplicado no arquivo recebido, que contava com a máxima da média flutuante diária de 8 horas da concentração de ozônio captada pelo analisador. Novamente, apenas as estações classificadas como *Urbana* e *Bairro* foram consideradas.

### 4.2.3 ANÁLISE COM *AIRQ+*

A análise estatística do estudo foi possível a partir da utilização do modelo proposto pelo *AirQ+*, desenvolvido pela divisão europeia da Organização Mundial da Saúde. O modelo é utilizado para a estimativa dos impactos à saúde de uma determinada população a partir da exposição de poluentes atmosféricos específicos. A população considerada é aquela que vive na localidade do estudo durante um certo período. (GHOZIKALI et al., 2014)

A avaliação realizada é baseada na fração atribuível (*Attributable proportion* –  $AP$ ) da população que, exposta à um poluente, é acometida por problemas de saúde. A  $AP$  pode ser calculada a partir da seguinte equação (KRZYZANOWSKI, 1997):

$$AP = \frac{\sum ((RR(c) - 1) \cdot P(c))}{\sum (RR(c) \cdot P(c))} \quad (4.3)$$

Em que  $AP$  é a fração atribuível do impacto na saúde,  $RR$  o risco relativo para um resultado de saúde e  $P(c)$  a população exposta ao poluente. O risco relativo  $RR$  de um evento – no caso, mortes a partir da exposição a um poluente –, pode ser calculado da seguinte maneira (COPENHAGEN: WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE, 2020)

$$RR(x) = \exp(\beta \cdot (x - x_0)) \quad (4.4)$$

Sendo  $\beta$  o coeficiente obtido a partir de estudos empíricos – disponíveis e disponibilizados no software *AirQ+* –,  $x$  a concentração do poluente e  $x_0$  o valor de referência do poluente da OMS (GENEVA: WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE, 2021). Caso a frequência do evento na população considerada seja conhecida, a frequência atribuída à exposição pode ser calculada a partir da equação 4.5:

$$IE = I \cdot AP \quad (4.5)$$

Em que  $IE$  é a taxa do evento atribuída à exposição e  $I$ , a frequência basal da consequência de saúde na população estudada. Com o tamanho da população, o número de casos pode ser estimado a partir da equação 4.6:

$$NE = IE \cdot N_{POP} \quad (4.6)$$

Em que  $NE$  é o número de casos atribuídos à exposição ao poluente e  $N_{POP}$ , o tamanho da população investigada.

## 5 DISCUSSÃO E RESULTADOS

A investigação do impacto da poluição no número de óbitos por ano de determinada cidade deve ser acompanhada da compreensão do seu perfil socioeconômico e das concentrações ao longo do tempo dos poluentes que interferem consideravelmente na qualidade do ar, de forma a estabelecer a evolução temporal do impacto na saúde.

Em benefício de uma análise de dados e comparações mais consolidadas e coesas, as porcentagens de óbitos associados à cada poluente em relação a população das respectivas cidades foi aplicada a uma mesma base de 100.000 habitantes.

### 5.1 NÚMERO DE ÓBITOS ANUAL ASSOCIADO À CADA POLUENTE

#### 5.1.1 $PM_{2.5}$

Como discutido na seção 2.1.1 deste estudo, material particulado é um dos poluentes mais agressivos para a saúde humana, assim, as menores concentrações tem efeito considerável nas taxas de óbito.

A figura 5.1 revela maior representatividade de óbitos associados à exposição a curto prazo de  $PM_{2.5}$  nas cidades de Rio Claro e Paulínia. Enquanto que a figura 5.2 relacionada ao longo prazo apresenta índices de óbitos mais expressivos em Santa Gertrudes e Rio Claro.

Rio Claro apresentou valores elevados de óbitos associados aos níveis de  $PM_{2.5}$  em todos os anos analisados devido sua indústrias têxtil e de papel (mencionadas na seção 2.2), porque o material particulado é gerado durante processos de moagem, trituração ou manuseio desses materiais sólidos que compõem essas indústrias. O destaque de Paulínia em 2021 no impacto a curto prazo na saúde é justificável pela queima de combustíveis da indústria petroquímica, gerando material particulado na atmosfera.

No caso de Santa Gertrudes, sua influência considerável sob a mortalidade à longo prazo é associada à indústria de cerâmica (mencionada na seção 2.2), cuja diversas etapas operacionais produzem partículas finas no ar, as quais ficam suspensas. A falta de óbitos associados ao  $PM_{2.5}$  na exposição a curto prazo em Santa Gertrudes ocorreu devido à menor população da cidade, o que resulta em uma insuficiência de dados para o modelo estatístico realizar uma estimativa.

Figura 5.1: Óbitos associados à exposição de curto prazo ao poluente  $PM_{2.5}$  de 2019 à 2022

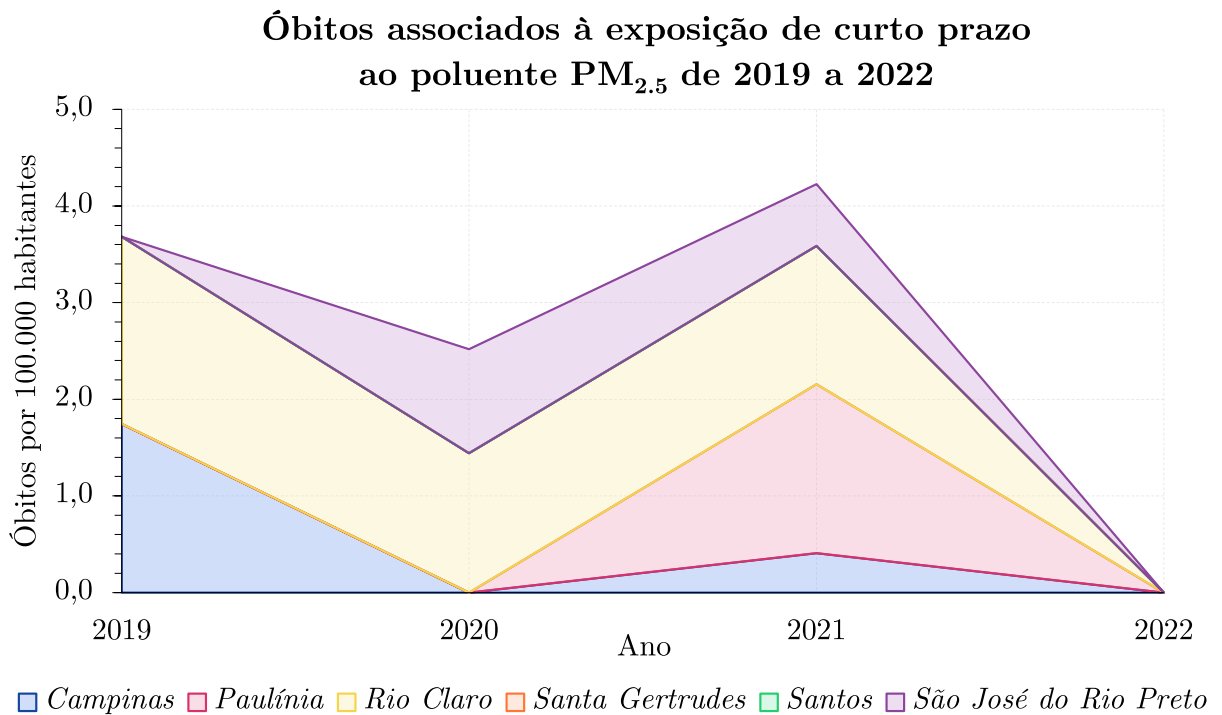
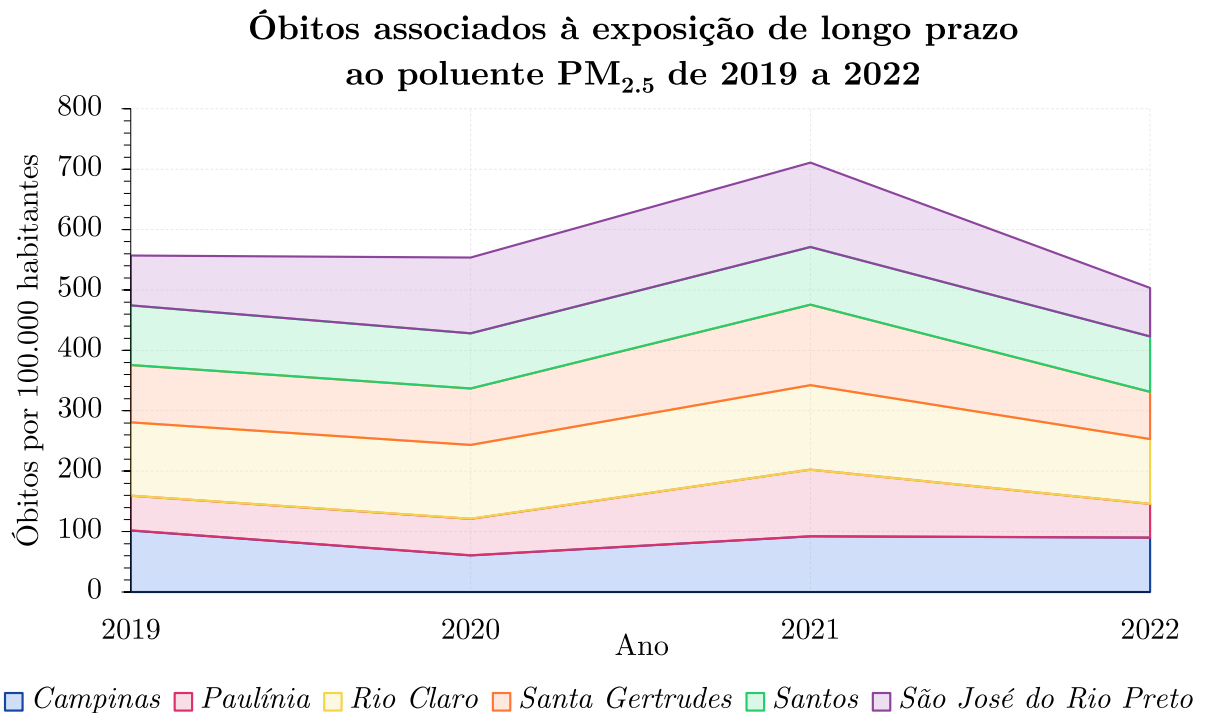


Figura 5.2: Óbitos associados à exposição de longo prazo ao poluente  $PM_{2.5}$  de 2019 à 2022



### 5.1.2 $PM_{10}$

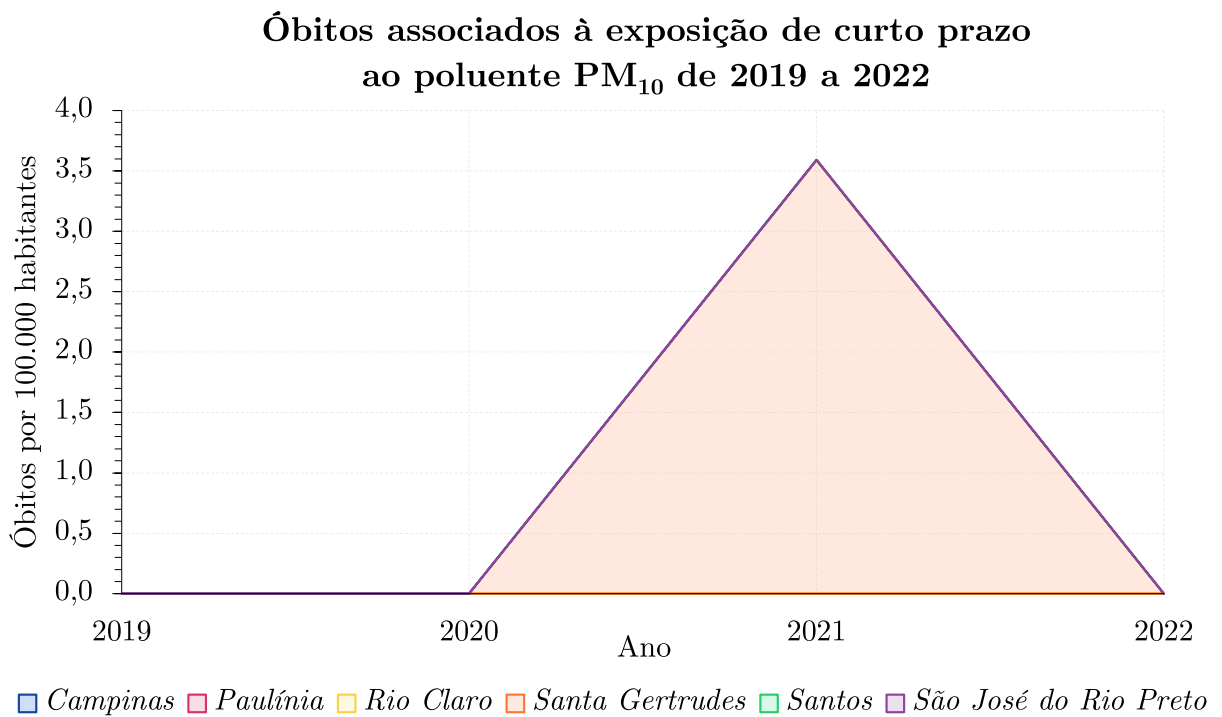
O material particulado  $PM_{10}$  na atmosfera é composto por cinzas, poeira de cimento e poeira assentada, como revela a tabela 2.2 da seção 2.1.1. Esse particulado representa alto risco para a saúde humana como o  $PM_{2.5}$ .

No cumulativo de 2019 a 2022, Santa Gertrudes e Rio Claro são as cidades com maior número de óbitos associados à exposição à longo prazo de  $PM_{10}$  e Santa Gertrudes é a única cidade do estudo com óbitos relacionados ao contato de curto prazo com o poluente em questão, como apresentado nas figuras 5.3 e 5.4.

Os resultados de óbitos associados a curto prazo são pouco expressivos porque, de maneira geral, esse tipo de material particulado é menos encontrado em regiões urbanas, principalmente quando comparado a outros materiais particulados. Partículas menores são mais comuns em áreas densamente povoadas, onde há tráfego intenso, queima de combustíveis fósseis e atividades industriais intensas. O  $PM_{10}$ , por outro lado, pode ser mais comum em áreas onde há muita poeira, como regiões áridas, locais com construção em grande escala ou produções industriais que costumam produzir muita poeira.

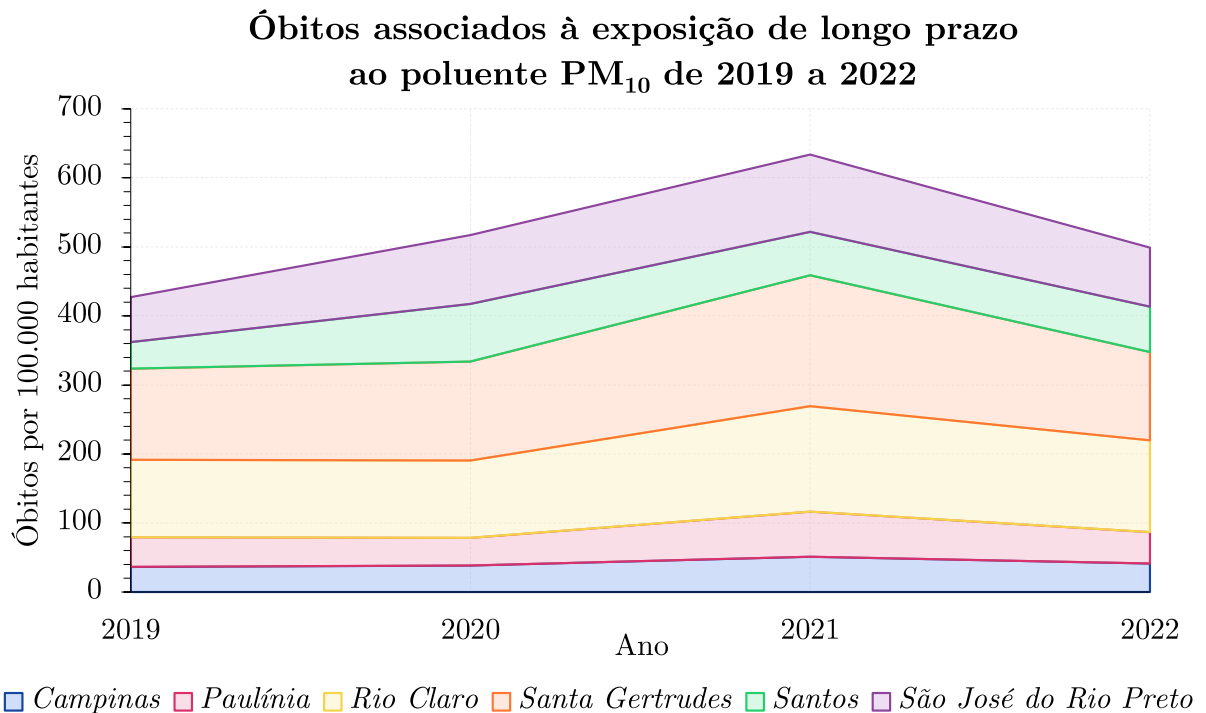
Como descrito na seção 2.2, Santa Gertrudes possui uma economia voltada aos cerâmicos e Rio Claro é um polo de indústria têxtil e de papel. Essas produções geram quantidades consideráveis de material particulado que podem gerar sérios riscos à saúde da população.

Figura 5.3: Óbitos associados à exposição de curto prazo ao poluente  $PM_{10}$  de 2019 à 2022



Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 5.4: Óbitos associados à exposição de longo prazo ao poluente  $PM_{10}$  de 2019 à 2022



### 5.1.3 $O_3$

Os gráficos das figuras 5.5 e 5.6 revelam que Rio Claro e Campinas são as cidades com maiores índices de óbitos relacionados à poluição de ozônio na atmosfera.

Esse resultado é justificado pela presença da indústria automobilística e da alta concentração de veículos de Campinas, pois os veículos queimam combustíveis fósseis e liberam óxidos de nitrogênio na atmosfera. Esses óxidos são um dos principais precursores do ozônio troposférico por reagirem com compostos orgânicos voláteis (VOCs) na presença de luz solar para formar ozônio. Deve-se considerar que os veículos também emitem hidrocarbonetos (HCs) como subprodutos da queima de combustível e os HCs são precursores do ozônio, quando combinados com  $NO_x$  sob condições adequadas, contribuem para a formação de ozônio. Essa análise foi fundamentada nos conceitos da seção 2.2.

No caso de Rio Claro, a cidade possui uma indústria têxtil, que frequentemente utiliza solventes voláteis (que podem ser um tipo de VOCs), e possui uma forte produção de papel, que emite VOCs pelo processamento da madeira. Ademais, as indústrias, incluindo as têxteis e de papel, muitas vezes têm equipamentos que queimam combustíveis fósseis para gerar energia necessária à produção. A queima de combustíveis pode resultar na

emissão de  $\text{NO}_2$ , um precursor do ozônio troposférico.

Figura 5.5: Óbitos associados à exposição de curto prazo ao poluente  $\text{O}_3$  de 2019 à 2022

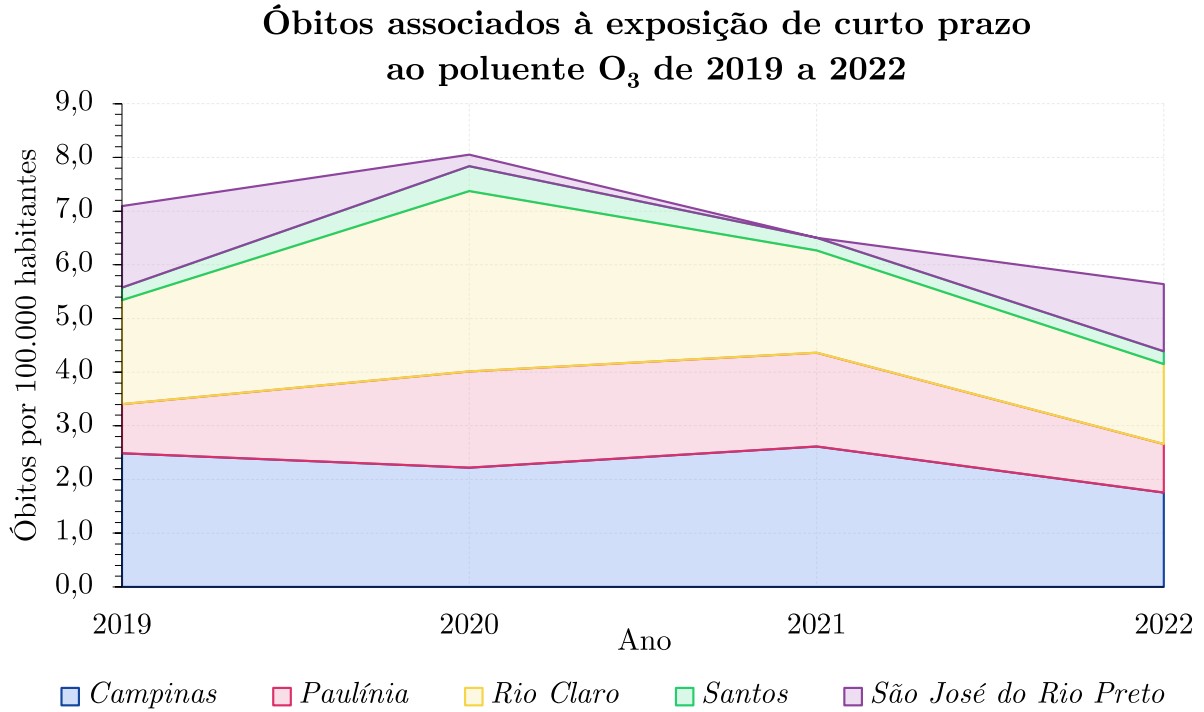
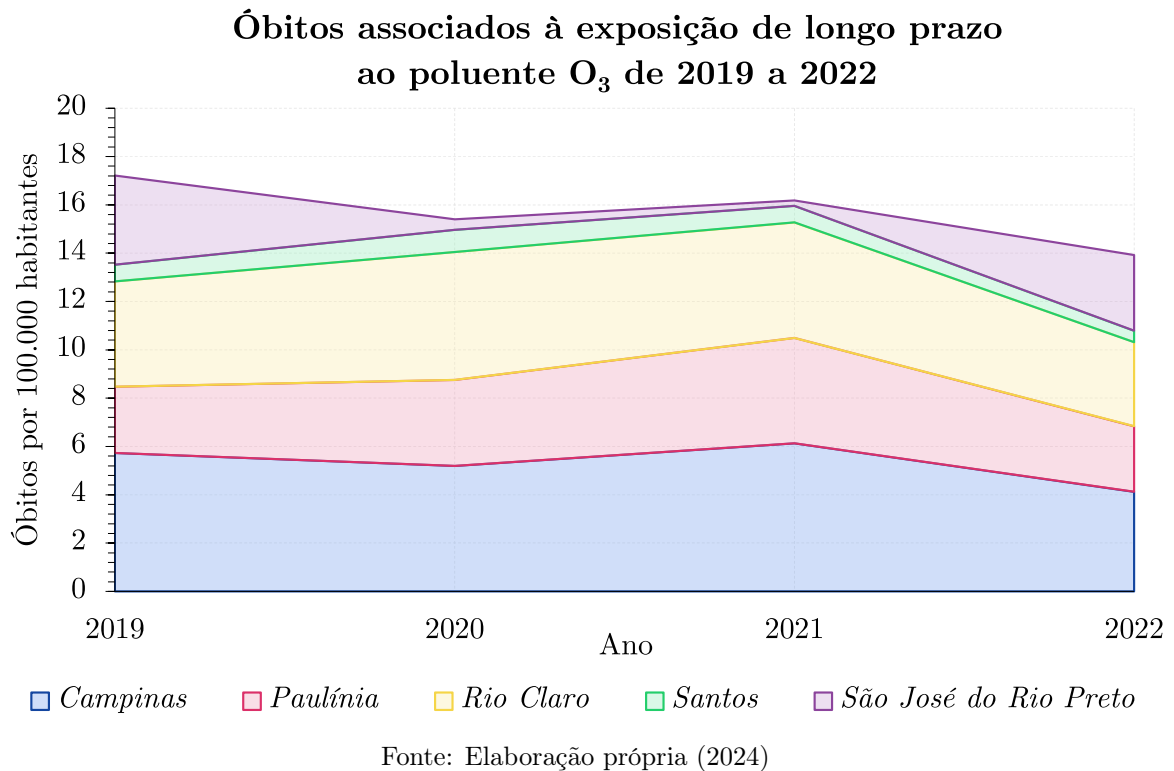


Figura 5.6: Óbitos associados à exposição de longo prazo ao poluente  $\text{O}_3$  de 2019 à 2022



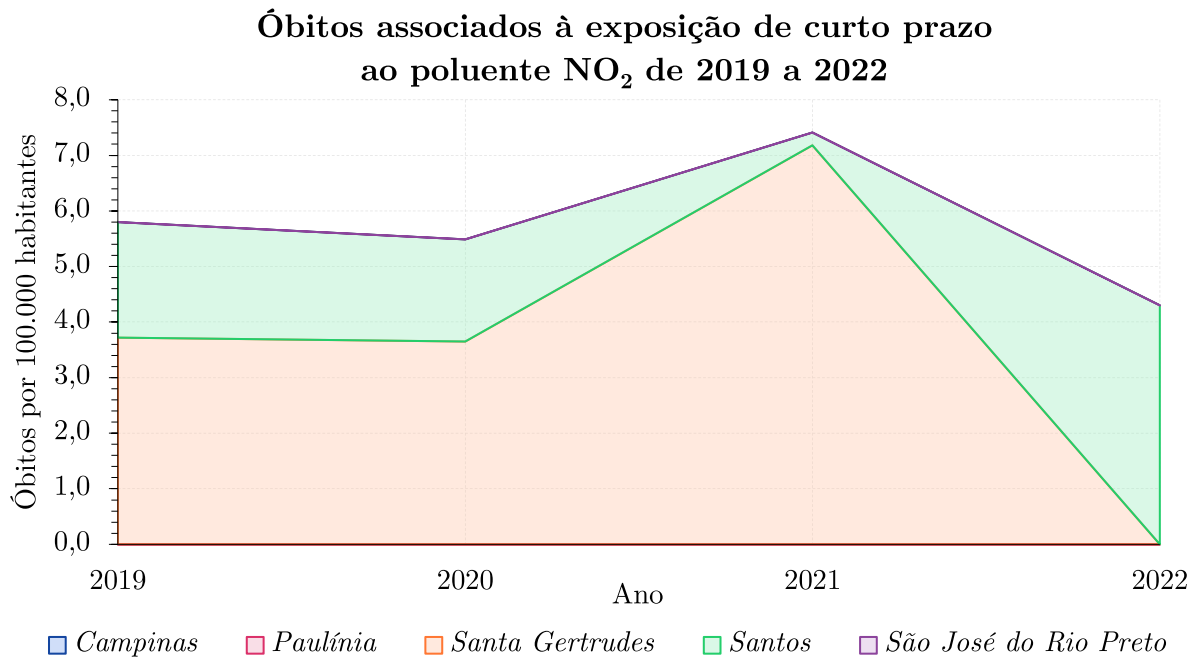
#### 5.1.4 NO<sub>2</sub>

O dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) é irritante ao sistema respiratório e é associado à muitas doenças respiratórias, como mencionado anteriormente. Além disso, ele impacta na produção de ozônio, como apresentado na seção 2.1.2. As cidades com maiores níveis de óbitos relacionados à poluição de NO<sub>2</sub> na atmosfera são Santa Gertrudes e Santos, de acordo com os gráficos das figuras 5.5 e 5.6.

Santa Gertrudes encontra-se em destaque devido sua indústria de cerâmicos que gera NO<sub>2</sub> de diversas fontes. Muitas fábricas de cerâmica utilizam fornos para a produção. Além disso, durante o processo de queima, é comum utilizar combustíveis fósseis, como gás natural ou carvão, para gerar calor. A queima desses combustíveis pode resultar na liberação de óxidos de nitrogênio, incluindo dióxido de nitrogênio, na atmosfera. Alguns processos na fabricação de cerâmica podem envolver o uso de produtos químicos que contenham nitrogênio, por exemplo, alguns esmaltes e revestimentos cerâmicos podem conter. Por fim, em algumas instalações, resíduos cerâmicos ou materiais não utilizados podem ser queimados como uma forma de descarte, liberando o NO<sub>2</sub>.

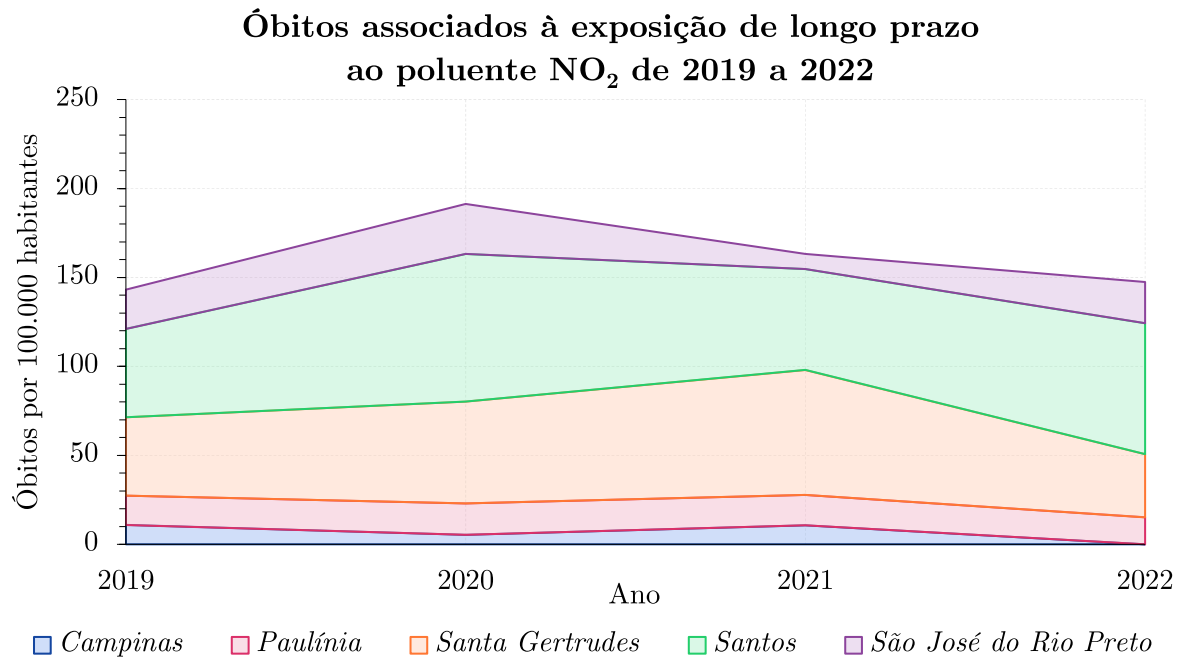
Tratando-se de Santos, a poluição de NO<sub>2</sub> é associada aos navios utilizam frequentemente motores que queimam combustíveis pesados, como óleo combustível ou diesel. Durante a queima desses combustíveis, são liberados óxidos de nitrogênio, dos quais o NO<sub>2</sub> é um componente. Essas emissões podem ocorrer durante a navegação, quando os navios estão em movimento dentro e fora dos portos, bem como durante a operação dos motores enquanto estão atracados. Os veículos que se aproximam da zona portuária também emitem hidrocarbonetos (HCs) como subprodutos da queima de combustível. Os veículos de transporte de carga, empilhadeiras, guindastes e outros equipamentos utilizados na movimentação de cargas dentro do porto muitas vezes funcionam com motores a diesel ou a gás, logo, também podem emitir NO<sub>2</sub>.

Figura 5.7: Óbitos associados à exposição de curto prazo ao poluente NO<sub>2</sub> de 2019 à 2022



Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 5.8: Óbitos associados à exposição de longo prazo ao poluente NO<sub>2</sub> de 2019 à 2022



Fonte: Elaboração própria (2024)

## 5.2 NÚMERO DE ÓBITOS ANUAL ASSOCIADO À POLUIÇÃO DO AR POR CIDADE

Para o estudo aprofundado do impacto da qualidade do ar nos níveis de mortalidade, é importante elaborar o perfil de poluição de cada cidade, entendendo como esse modelo pode ser correlacionado com a atividade econômica de cada centro urbano.

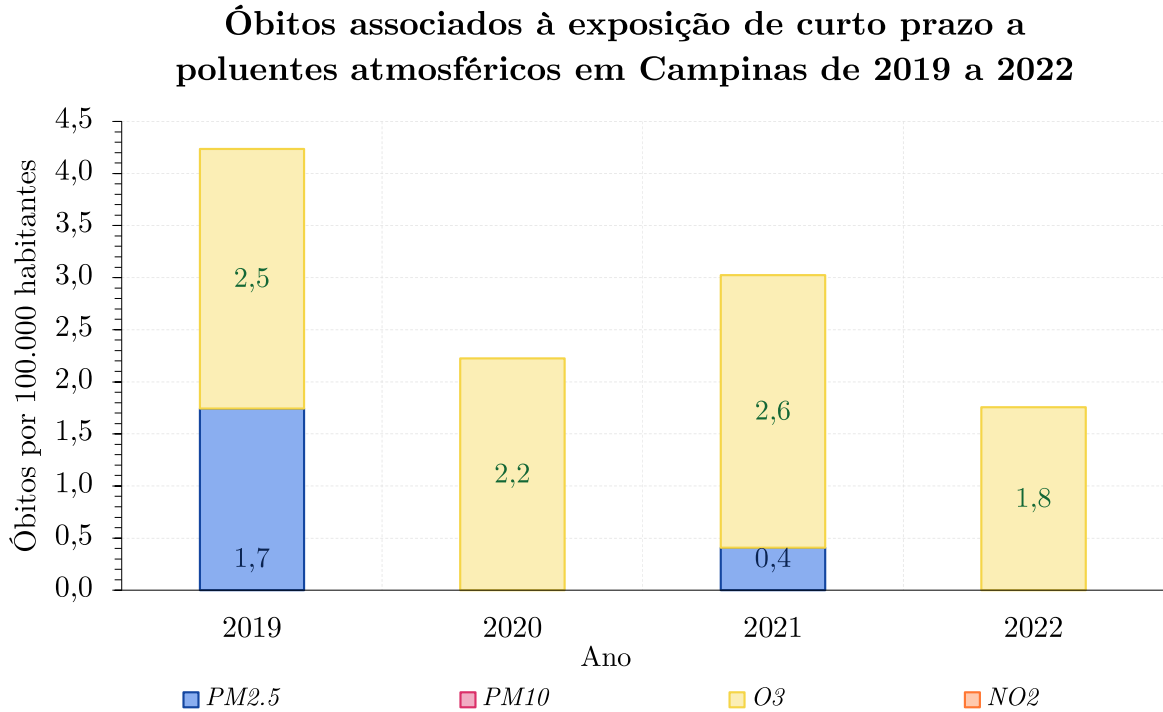
As figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.13 revelam que Campinas, Paulínia e Rio Claro possuem um perfil de qualidade do ar similar, apesar dos anos de pico de óbitos associados à poluição serem diferentes. Isso porque há uma forte influência a curto prazo da exposição ao ozônio no número de óbitos nessas cidades, que foi parcialmente discutida anteriormente. Essa expressividade do ozônio é acompanhada do impacto à exposição de curto e de longo prazo ao  $PM_{2.5}$  e ao  $PM_{10}$ , provavelmente proveniente das partículas emitidas dos resíduos sólidos gerados pelas refinarias de petróleo de Paulínia, da indústria automobilística de Campinas e da indústria têxtil e de papel de Rio Claro, como mencionado na seção 2.2.

Em oposição, Santa Gertrudes, Santos e São José do Rio Preto seguem uma outra tendência de qualidade do ar, com anos distintos de ápice de óbitos associados à poluição, como apresentado nas figuras 5.15, 5.15, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20. Dada a exposição a curto prazo, observa-se uma relevância maior dos níveis de  $NO_2$  nessas três cidades. Ao analisar os óbitos associados à exposição a longo prazo, eles são predominantemente causados da presença de  $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$ , mas também possuem uma parcela associada ao  $NO_2$ . Esses resultados são justificados pelas bases econômicas dessas cidades, produção de cerâmica, agroindústria e instalações portuárias, como descrito na seção 2.2, que são fontes de material particulado e óxido de nitrogênio.

O fato de cidades com alto índices de mortalidade associada  $NO_2$  possuírem valores baixos desse mesmo índice para  $O_3$ , coloca em questão a relação entre existência de óxido de nitrogênio no ar e a de ozônio na troposfera, justificada na seção 2.1.2. Apesar da interligação existir entre esses dois poluentes, há razões pelas quais as cidades com os maiores níveis de ozônio atmosférico nem sempre possuírem os maiores níveis de óxido de nitrogênio. As fontes de emissão de  $NO_2$  e compostos orgânicos voláteis podem variar de uma cidade para outra, dependendo de fatores como densidade populacional, atividades industriais e padrões de uso da terra. Portanto, as cidades com altos níveis de óxidos de nitrogênio podem não necessariamente ter as maiores concentrações de ozônio se não houver uma abundância suficiente de precursores orgânicos voláteis para reagir com  $NO_2$

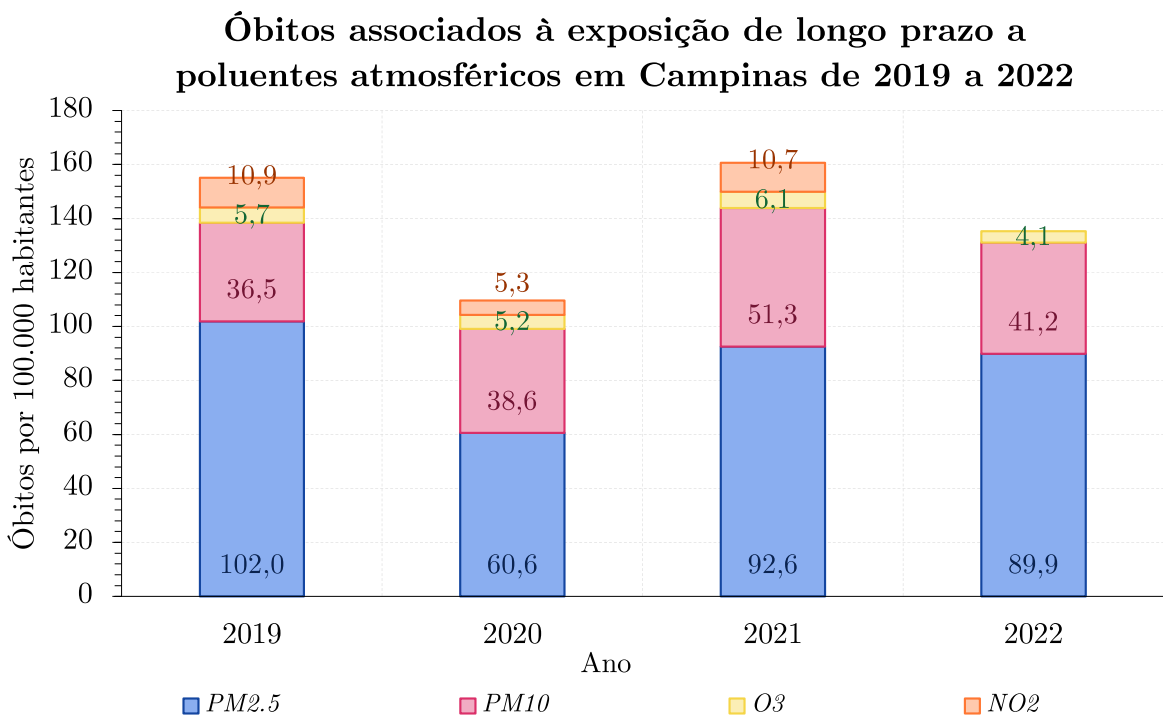
na presença de luz solar.

Figura 5.9: Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Campinas de 2019 a 2022



Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 5.10: Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Campinas de 2019 a 2022



Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 5.11: Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Paulínia de 2019 a 2022

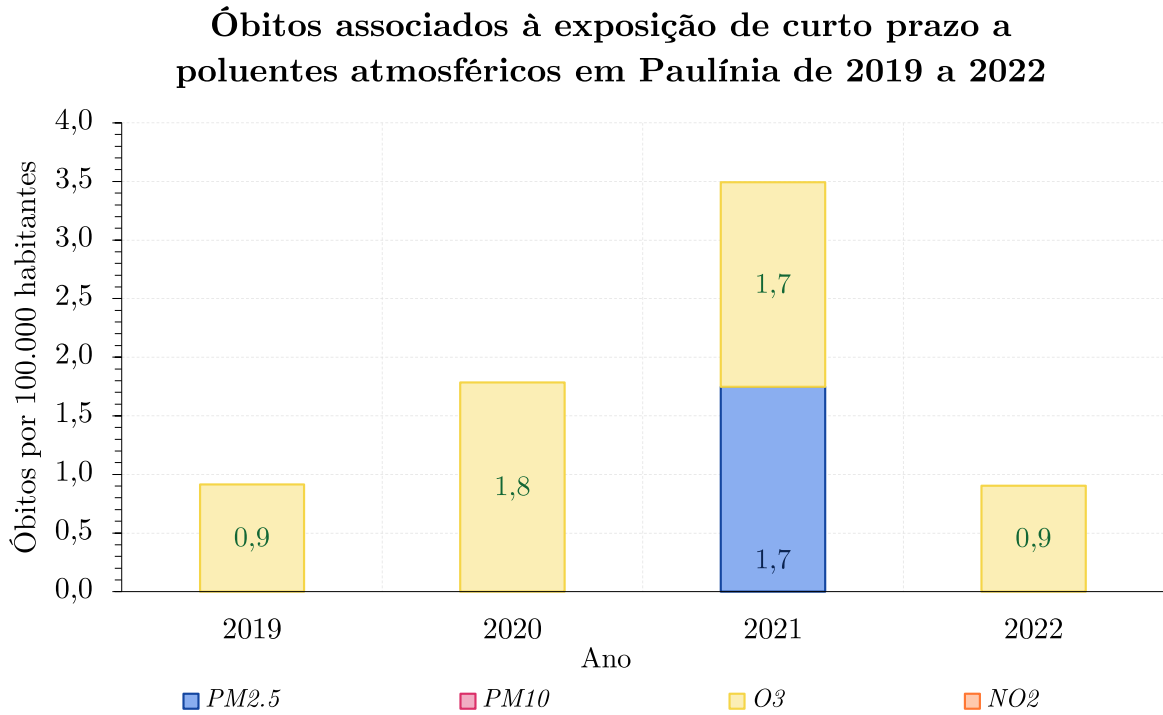


Figura 5.12: Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Paulínia de 2019 a 2022

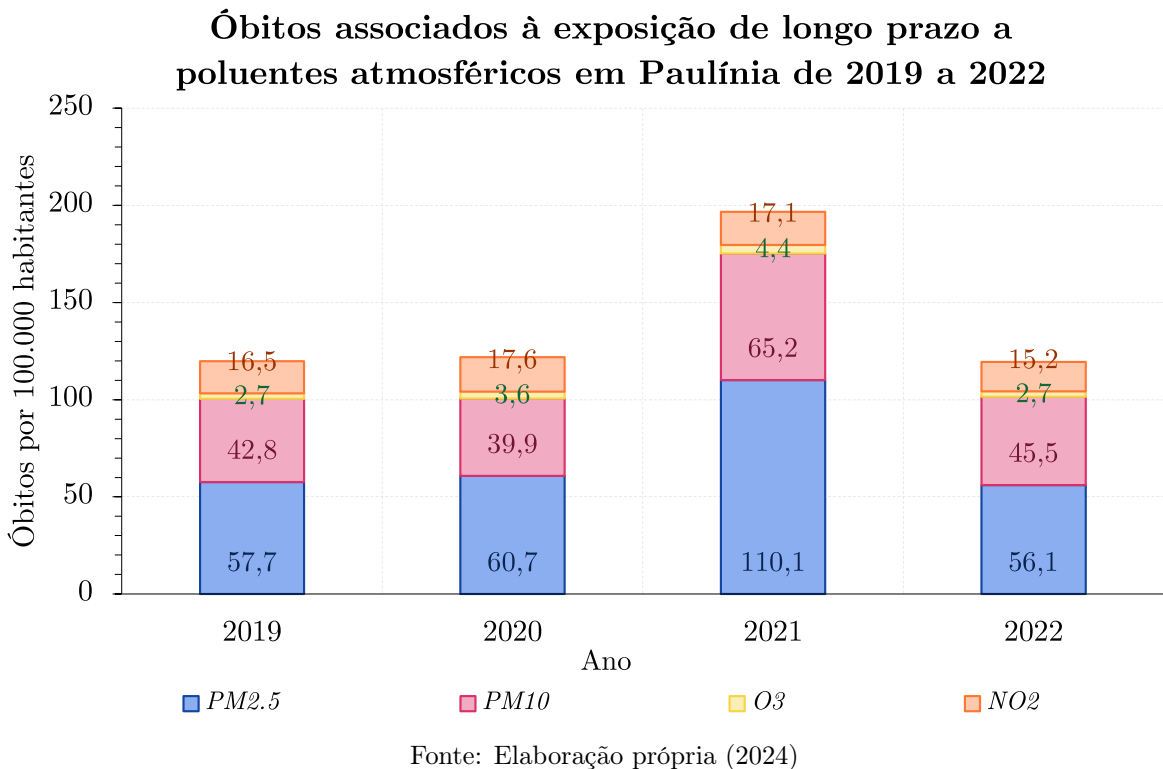


Figura 5.13: Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Rio Claro de 2019 a 2022

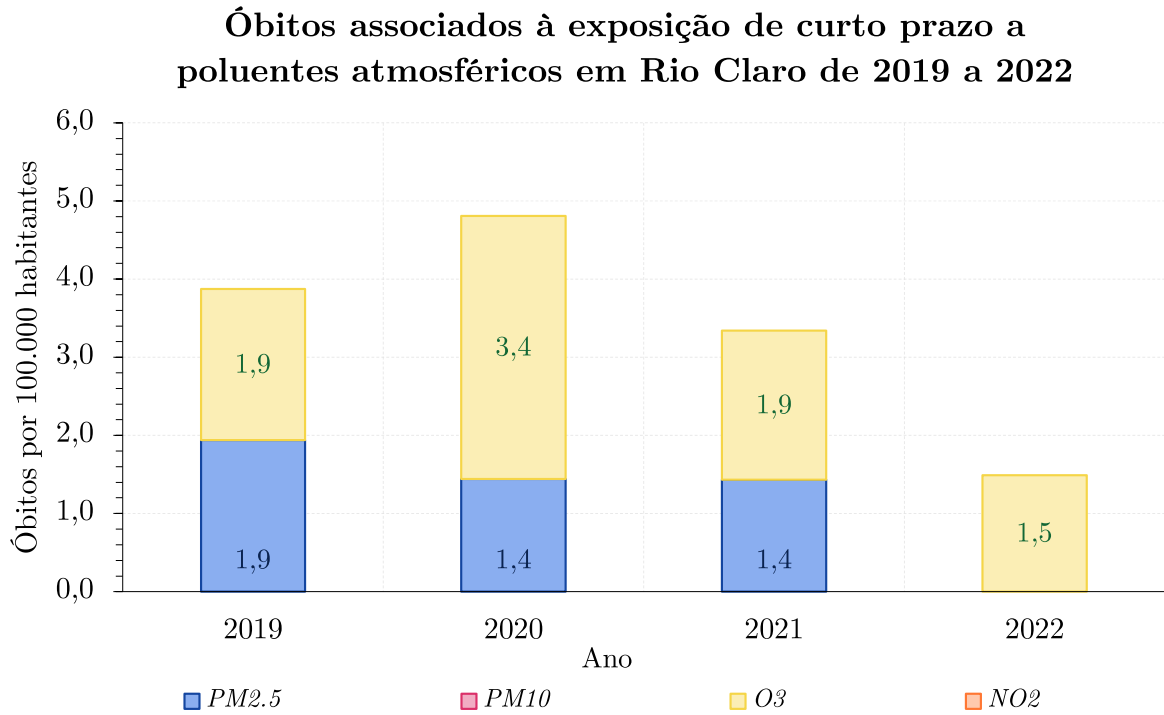


Figura 5.14: Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Rio Claro de 2019 a 2022

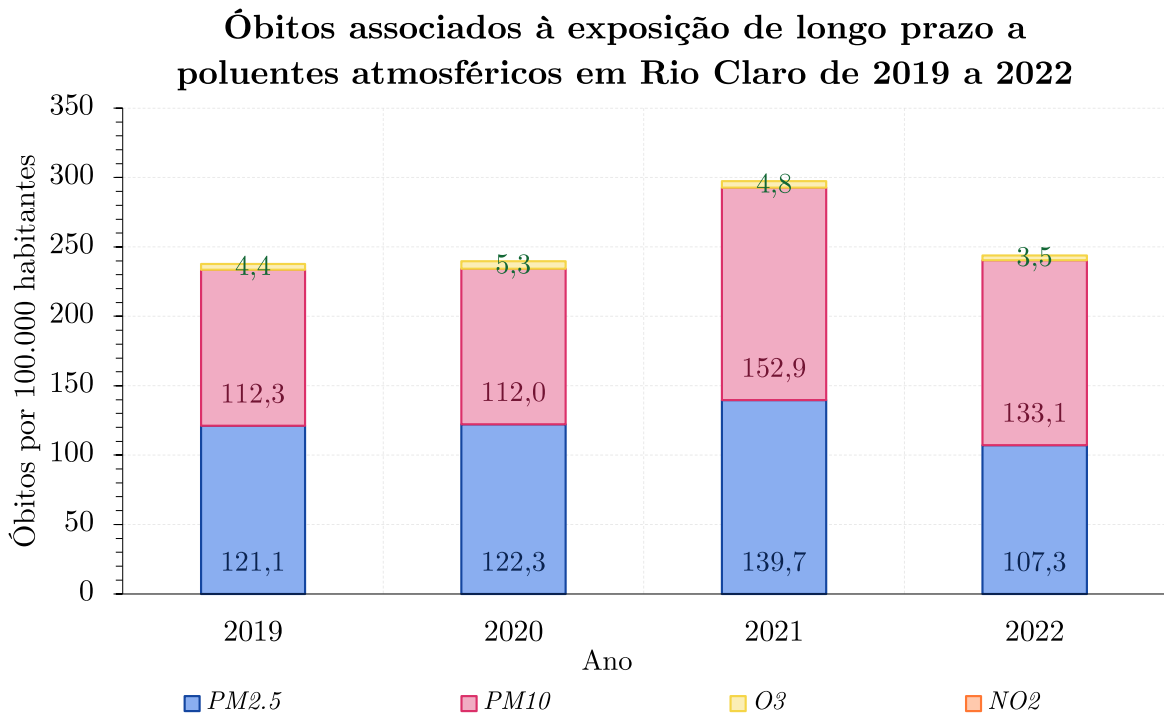


Figura 5.15: Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Santa Gertrudes de 2019 a 2022

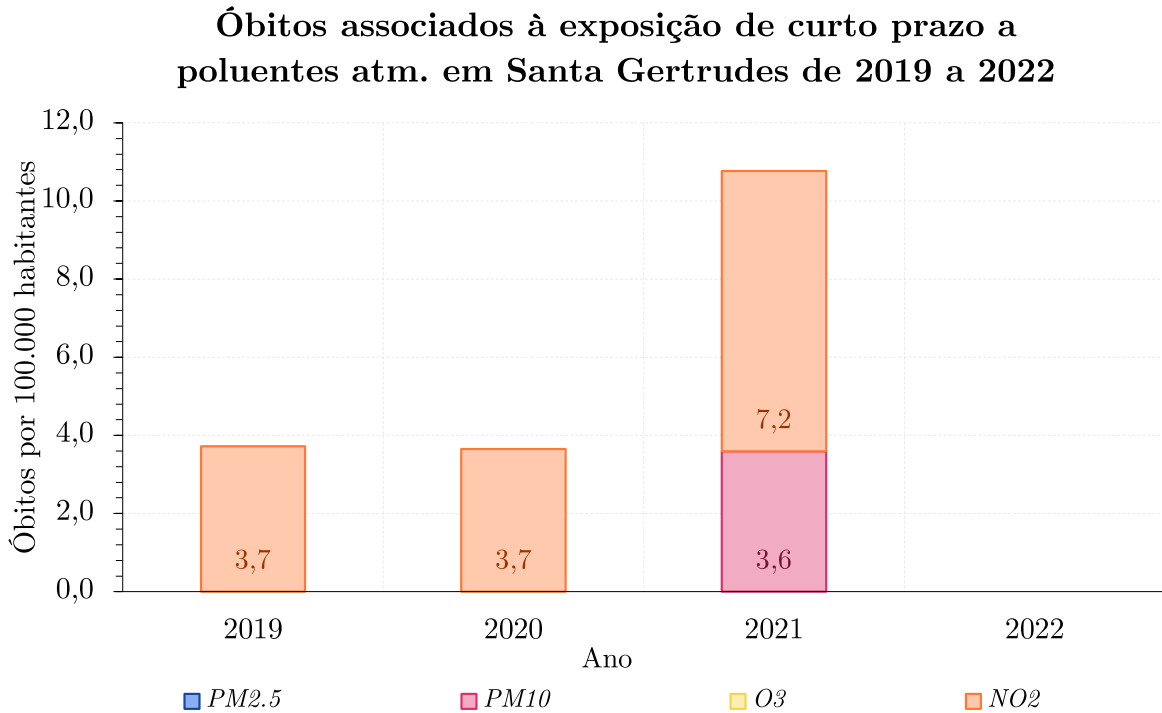


Figura 5.16: Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Santa Gertrudes de 2019 a 2022

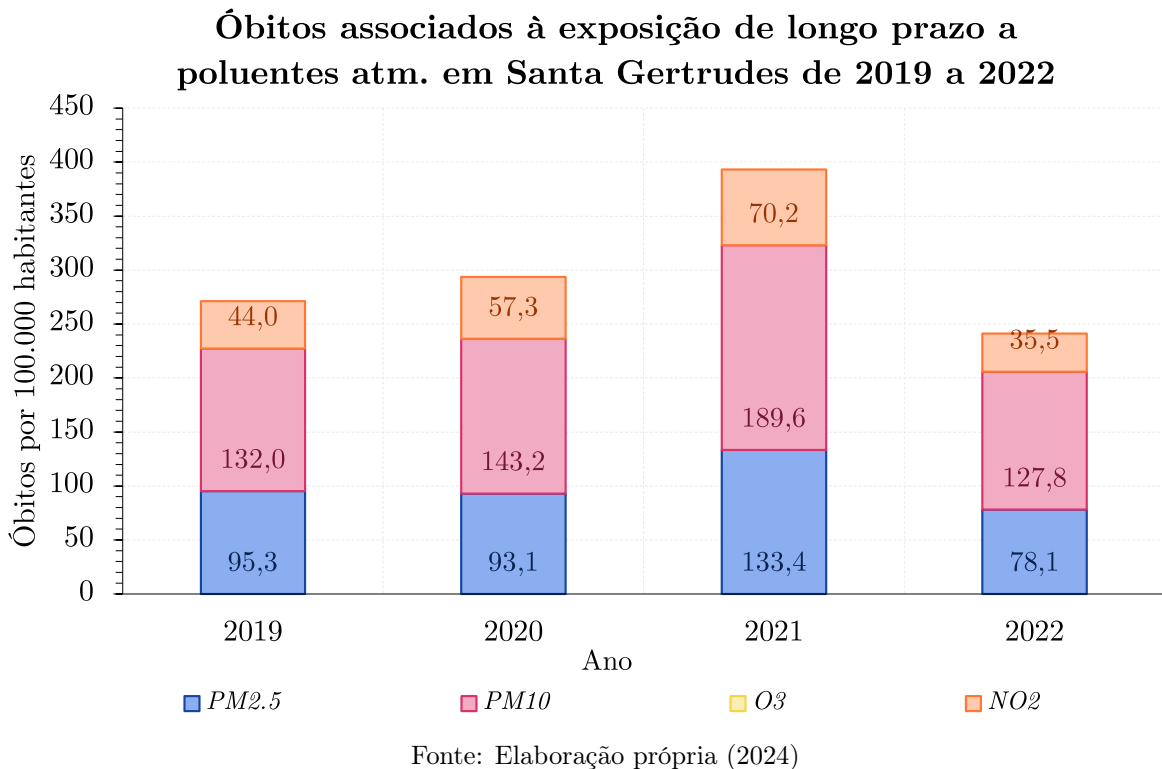


Figura 5.17: Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em Santos de 2019 a 2022

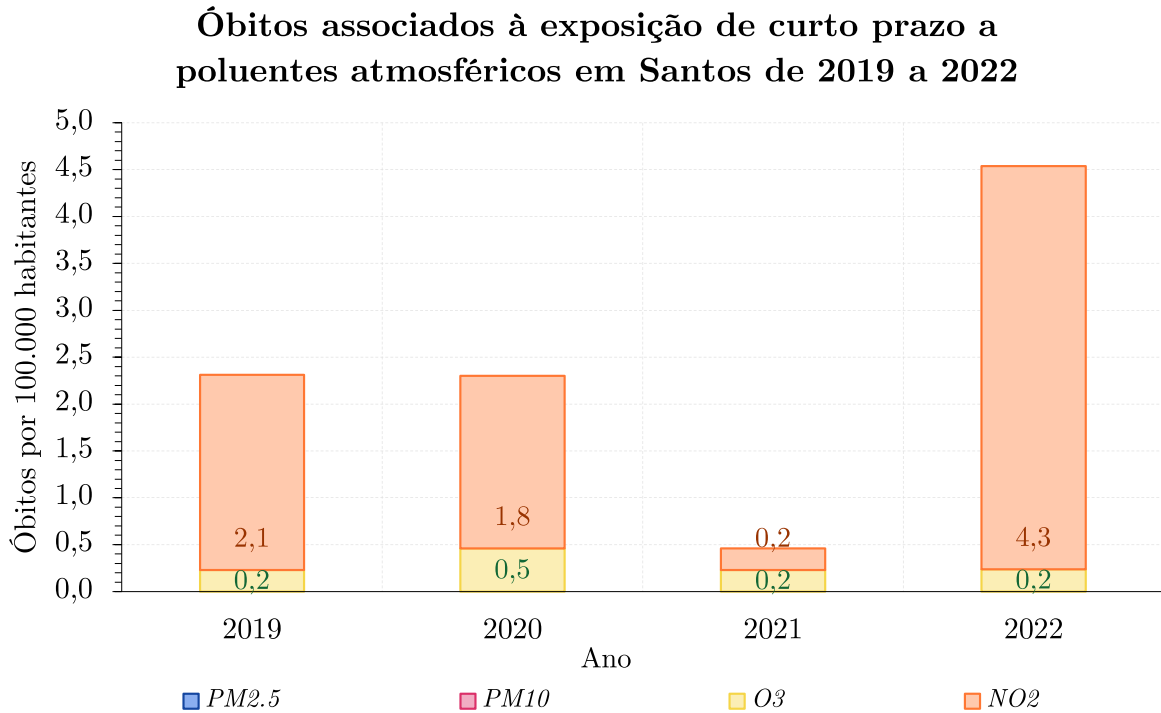


Figura 5.18: Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em Santos de 2019 a 2022

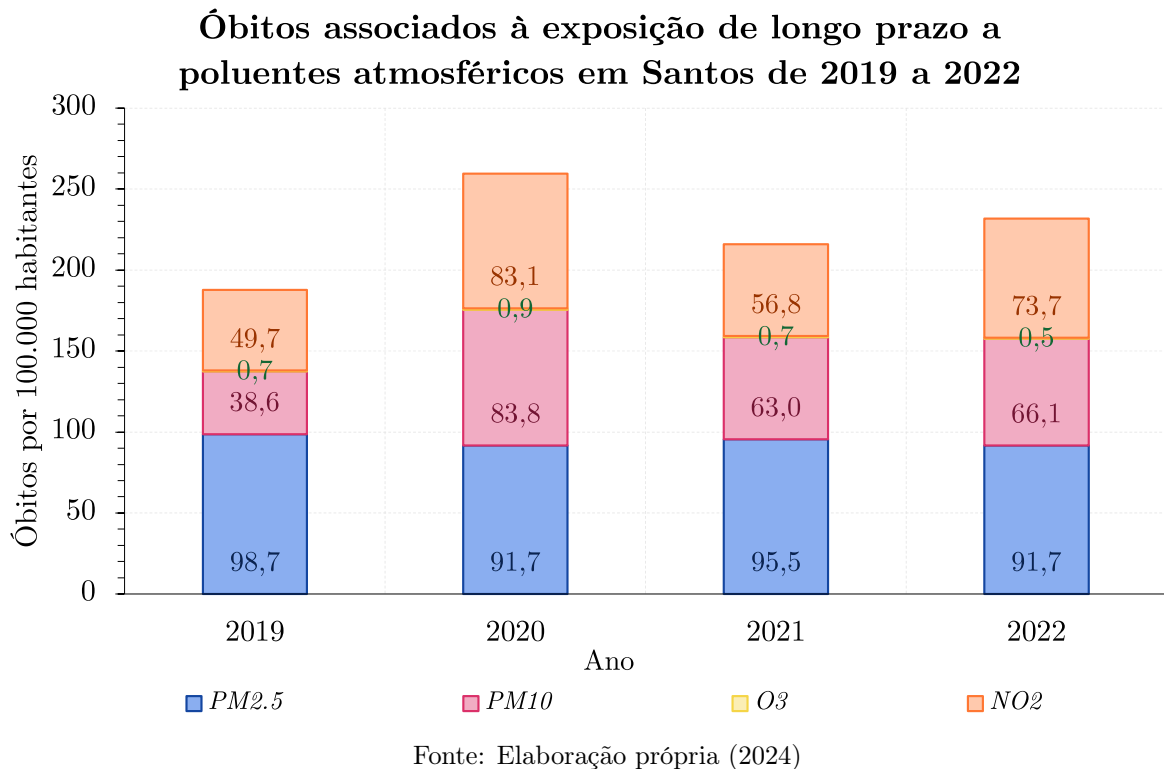


Figura 5.19: Óbitos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos em São José do Rio Preto de 2019 a 2022

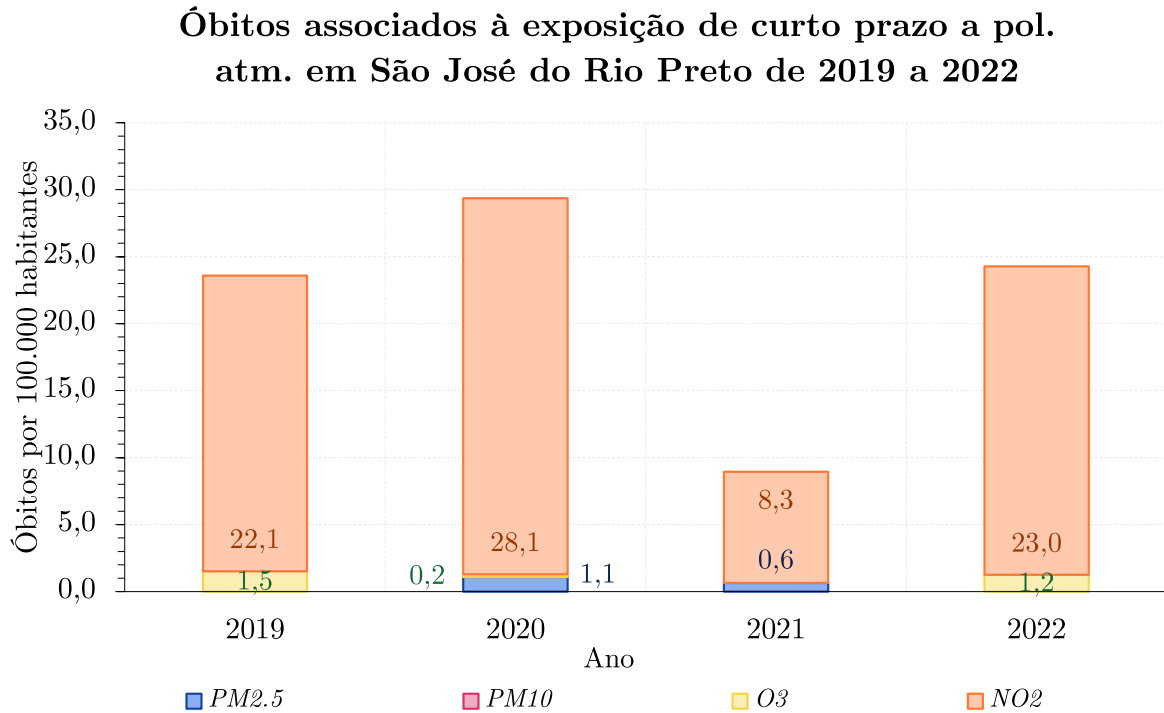
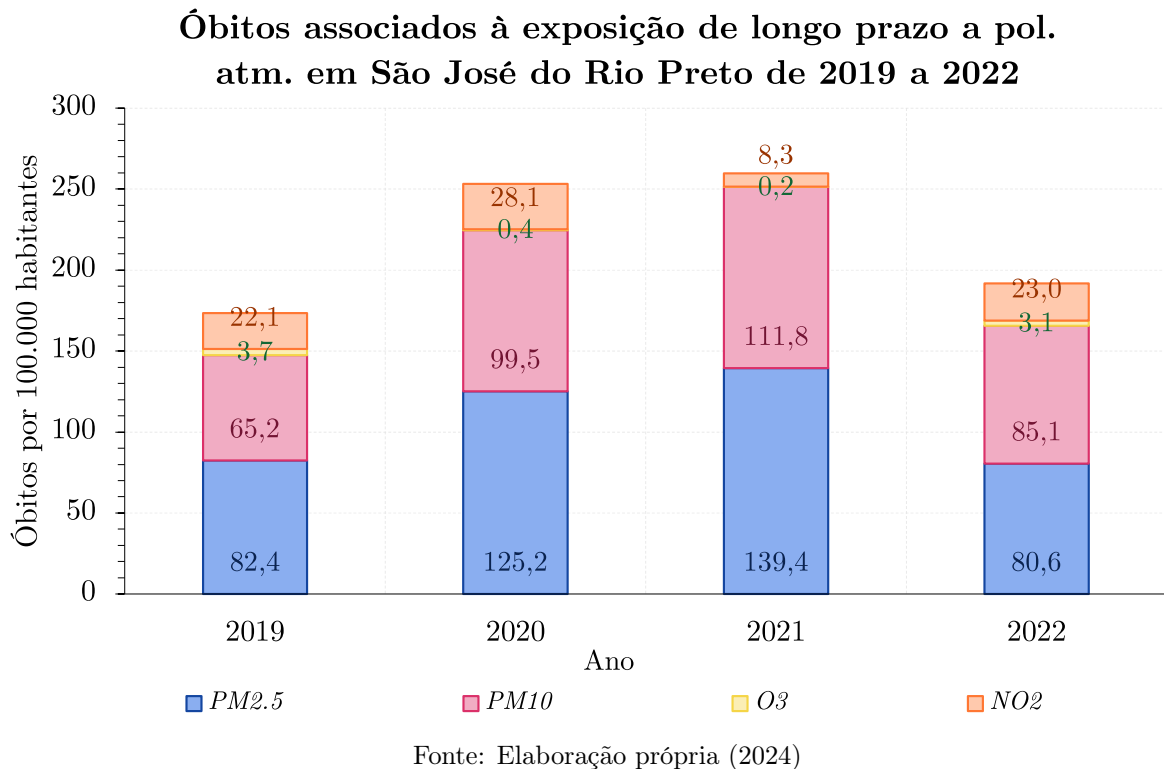


Figura 5.20: Óbitos associados à exposição de longo prazo a poluentes atmosféricos em São José do Rio Preto de 2019 a 2022



### 5.3 IMPACTO DOS POLUENTES A LONGO E A CURTO PRAZO

A tabela 5.1 indica os poluentes que mais contribuem para os óbitos associados ao contato de longo e de curto prazo nas cidades selecionadas. Observa-se nessa tabela que o dióxido de nitrogênio e o ozônio são consideravelmente mais impactantes na exposição a curto prazo do que o material particulado e o inverso ocorre para exposição a longo prazo.

Tabela 5.1: Poluente com maior número de óbitos associado à exposição a curto e a longo prazo por cidade

Cidade	Poluente com maior número de óbitos associado à exposição a curto prazo	Poluente com maior número de óbitos associado à exposição a longo prazo
<i>Campinas</i>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>
<i>Paulínia</i>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>
<i>Rio Claro</i>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub> e PM <sub>10</sub>
<i>Santos</i>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>2.5</sub>
<i>Santa Gertrudes</i>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>
<i>São José do Rio Preto</i>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>2.5</sub>

Fonte: Elaboração própria (2024)

Analisando os gráficos da seção 5.1, essa tendência também é observada. O montante de óbitos por 100.000 habitantes por exposição a curto prazo a NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> aproxima-se de 8, enquanto que para os materiais particulados, esse número é próximo de 4. O contrário é verificado para a exposição a longo prazo, a mortalidade associada aos poluentes de material particulado é consideravelmente maior, cerca de 500 a 600 óbitos associados a mais do que ozônio e dióxido de nitrogênio.

Além disso, comparando as cidades em cada ano e considerando somente a exposição a longo prazo aos poluentes, dado que seus resultados são mais numericamente representativos, Santa Gertrudes é a cidade com maior número de óbitos por 100.000 habitantes nos anos de 2019, 2020 e 2021, e em 2022 Rio Claro ultrapassa Santa Gertrudes.

## 6 CONCLUSÃO

Ao aplicar o modelo estatístico do software AirQ+, conclui-se que um número expressivo de óbitos são associados à poluição do ar nas cidades do interior de São Paulo estudadas. A discussão dos resultados destacou as cidades vinculadas a maior porcentagem dos casos, mas a maioria das cidades possuem mortes associadas aos quatro poluentes do estudo. Portanto, reduzir a poluição do ar e proteger a qualidade do ar nas cidades torna-se uma prioridade crítica para a promoção da saúde e o bem-estar da população urbana.

Observa-se o impacto da atividade econômica no perfil de poluição atmosférica de cada cidade. A comparação dos perfis de poluição infere que o ozônio e o dióxido de nitrogênio são predominantes no impacto da exposição a curto prazo e o material particulado possuem mais óbitos associados a longo prazo.

Além disso, Rio Claro e Santa Gertrudes apresentaram os maiores índices de óbitos por 100.000 habitantes, o que indica que cidades pequenas com alta atividade industrial podem enfrentar desafios únicos em relação à poluição, muitas vezes resultando em níveis de poluição mais elevados do que em cidades maiores.

# APÊNDICE A – TABELAS FONTE DAS SIMULAÇÕES

Tabela A.1: Classificação das cidades em que analisadores (MP<sub>2.5</sub>, MP<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>) da CETESB estão instalados e seus respectivos tipos

<b>Analisador</b>	<b>Classificação</b>	<b>Tipo MP<sub>10</sub></b>	<b>Tipo MP<sub>2.5</sub></b>	<b>Tipo NO<sub>2</sub></b>	<b>Tipo O<sub>3</sub></b>
Campinas-Taquaral	Campinas				Urbana
Campinas-V.União	Campinas		Urbana	Urbana	Urbana
Capão Redondo	São Paulo	Bairro		Bairro	Bairro
Carapicuíba	Outros				
Cid.Universitária- USP-Ipen	São Paulo		Urbana	Urbana	Urbana
Congonhas	São Paulo	Micro	Micro	Micro	Micro
Grajaú-Parelheiros	São Paulo	Micro	Micro	Micro	Micro
Guaratinguetá	Outros				
Guarulhos- Paço Municipal	Outros				
Guarulhos-Pimentas	Outros				
Ibirapuera	São Paulo	Média	Urbana	Urbana	Urbana
Interlagos	São Paulo	Bairro		Urbana	Urbana
Itaim Paulista	São Paulo	Urbana	Urbana	Urbana	Urbana
Jundiaí	Outros				
Limeira	Outros				
Marg.Tietê- Ponte dos Remédios	São Paulo	Micro	Micro	Micro	Micro
Mauá	Outros				
Mogi das Cruzes	Outros				
Mooca	São Paulo	Média	Média		Bairro
Osasco	Outros				
Parque D.Pedro II	São Paulo	Bairro	Bairro	Bairro	Bairro
Paulínia	Paulínia				Bairro
Paulínia-Sta Terezinha	Paulínia	Bairro	Bairro	Bairro	Bairro
Paulínia-Sul	Paulínia				Bairro
Perus	Outros				
Pico do Jaraguá	São Paulo		Urbana	Urbana	Urbana
Pinheiros	São Paulo	Micro	Micro	Micro	Micro
Piracicaba	Outros				
Ribeirão Preto	Outros				
Rio Claro- Jd.Guanabara	Rio Claro	Urbana	Urbana		Urbana
S.Bernardo-Centro	Outros				
S.José Campos -Jd.Satélite	Outros				
Santa Gertrudes	Santa Gertrudes	Bairro	Bairro	Bairro	
Santana	São Paulo	Média	Média		Média
Santo Amaro	São Paulo	Média			Bairro
Santos	Santos				Bairro
Santos-Ponta da Praia	Santos	Bairro		Bairro	Bairro
São Caetano do Sul	Outros				
São José do Rio Preto	São José do Rio Preto	Urbana	Urbana	Urbana	Urbana
São Sebastião	Outros				
Taboão da Serra	Outros				
Taubaté	Outros				

Fonte: CETESB

Tabela A.2: Série temporal de concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do poluente  $\text{MP}_{2.5}$  (sem representatividade)

Ano	Campinas	Paulínia	Rio Claro	Santa Gertrudes	Santos	São José do Rio Preto
2012					16,46607854	
2013					19,14493992	14,3318323
2014					17,7671772	15,63688727
2015	18,40395343				15,99329224	14,19620648
2016	17,72924459				14,60228783	15,23160721
2017	16,98412098				15,45432016	15,96281068
2018	15,78629129			16,01702266	14,29915176	14,78771544
2019	19,25899279	15,32525078	19,08695783	18,51759469	14,32716957	14,79659886
2020	12,24964792	14,14535497	17,97112499	16,13060225	12,34264367	16,77441077
2021	15,73239115	18,69393102	17,44954367	18,20201646	11,65597655	15,9329431
2022	14,41879908	13,61510774	14,96252682	15,76449071	11,50240023	13,22941244
2023	14,38161732	13,70591665	15,87076503	16,19642749	12,4880635	

Fonte: CETESB

Tabela A.3: Série temporal de concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do poluente  $\text{MP}_{2.5}$  (com representatividade)

Ano	Campinas	Paulínia	Rio Claro	Santa Gertrudes	Santos	São José do Rio Preto
2012					16,46607854	
2013					19,14493992	14,3318323
2014					17,7671772	15,63688727
2015					15,99329224	14,19620648
2016	17,72924459				14,60228783	15,23160721
2017	16,98412098				15,45432016	15,96281068
2018	15,78629129				14,29915176	14,78771544
2019	19,25899279	15,32525078		18,51759469	14,32716957	14,79659886
2020			17,97112499	16,13060225	12,34264367	16,77441077
2021	15,73239115	18,69393102	17,44954367	18,20201646	11,65597655	
2022	14,41879908	13,61510774	14,96252682	15,76449071	11,50240023	13,22941244
2023	14,38161732	13,70591665	15,87076503		12,4880635	

Fonte: CETESB

Tabela A.4: Série temporal de concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do poluente  $\text{MP}_{10}$ 

Ano	Campinas	Paulínia	Santa Gertrudes	Santos	São José do Rio Preto
2012		25,9614		30,6291	20,8627
2013		25,0520		27,7916	20,8629
2014		24,3915		27,9233	19,6522
2015	18,8615	21,0255		30,4869	17,9926
2016	18,0126	20,9689		26,8310	20,2948
2017	17,2321	22,1272		28,8090	21,1027
2018	15,6780	19,7632	34,3435	28,0778	21,0652
2019	15,6738	20,9029	32,6113	27,8828	19,8566
2020	12,4132	20,1019	36,4772	27,2846	19,8457
2021	13,9645	18,1580	35,3549	25,2142	12,4427
2022	9,9138	18,7893	28,5791	30,2256	18,9643

Fonte: CETESB

Tabela A.5: Série temporal de concentração SOMA 35 (*ppb · dia*) do poluente O<sub>3</sub>

Ano	Campinas	Paulínia	Rio Claro	Santa Gertrudes	Santos	São José do Rio Preto
2012					256,215	1314,355
2013					244,045	880,605
2014					230,31	1074,86
2015	1985,785				307,94	1338,72
2016	2899,64				228,715	988,28
2017	2813,895				158,5	1211,56
2018	2999,685	1760,335			142,465	1030,565
2019	3392,29	2205,025	2058,19		277,945	1772,455
2020	2683,71	2151,32	2457,465		287,56	141,275
2021	2595,505	2218,745	1736,895		185,85	88,03
2022	1901,685	1758,21	1477,2		117,885	1406,935

Fonte: CETESB

Tabela A.6: Série temporal da população residente estimada

Ano	Campinas	Paulínia	Rio Claro	Santa Gertrudes	Santos	São José do Rio Preto
2011	1.090.386	84.512	187.638	22.074	419.509	412.076
2012	1.098.630	86.800	188.977	22.499	419.614	415.769
2013	1.144.862	92.668	196.821	23.793	433.153	434.039
2014	1.154.617	95.221	198.413	24.272	433.565	438.354
2015	1.164.098	97.702	199.961	24.737	433.966	442.548
2016	1.173.370	100.128	201.473	25.192	434.359	446.649
2017	1.182.429	102.499	202.952	25.637	434.742	450.657
2018	1.194.094	106.776	204.797	26.403	432.957	456.245
2019	1.204.073	109.424	206.424	26.898	433.311	460.671
2020	1.213.792	112.003	208.008	27.381	433.656	464.983
2021	1.223.237	114.508	209.548	27.850	433.991	469.173
2022	1.139.047	110.537	201.418	23.611	418.608	480.439

Fonte: (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022)

Tabela A.7: Área territorial dos municípios

Ano	Campinas	Paulínia	Rio Claro	Santa Gertrudes	Santos	São José do Rio Preto
2010	794,4330	138,7200	837,2650	98,2910	280,6740	431,9630
2013	794,5710	138,7770	837,2640	98,2910	280,6740	431,9630
2014	794,5710	138,7770	837,2620	98,2910	280,6740	431,9440
2015	794,5710	138,7770	837,2630	98,2910	280,6740	431,9440
2016	794,5710	138,7770	834,6910	98,2910	281,0330	431,9440
2017	794,5710	138,7770	846,7990	98,2910	281,0330	431,9440
2018	794,5710	138,7770	846,7970	98,2910	281,0330	431,9440
2019	794,5710	138,7770	498,4220	98,2910	281,0330	431,9440
2020	794,5710	138,7770	498,4220	98,2910	281,0330	431,9440
2021	794,5710	138,7770	498,4220	98,2910	281,0330	431,9440
2022	794,5710	138,7770	498,4220	98,2910	281,0330	431,9440

Fonte: (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022)

Tabela A.8: Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Campinas

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total dos óbitos 30+	6.219	6.239	6.327	6.633	6.363	6.653	6.915	6.884	7.096	8.214	10.247	8.735
População 30+	612.643	627.248	641.891	656.522	670.835	684.497	697.951	711.102	723.877	736.195	747.304	679.740
Mortalidade 30+	0,010151	0,009947	0,009857	0,010103	0,009485	0,009720	0,009908	0,009681	0,009803	0,011157	0,013712	0,012851
População	1.090.386	1.098.630	1.144.862	1.154.617	1.164.098	1.173.370	1.182.429	1.194.094	1.204.073	1.213.792	1.223.237	1.139.047
Total dos óbitos	-	6.726	6.809	7.063	6.760	7.058	7.327	7.272	7.479	8.589	10.661	9.133
População	-	1.130.593	1.141.325	1.152.064	1.163.050	1.173.655	1.183.874	1.194.094	1.204.073	1.213.792	1.223.237	1.139.047
Mortalidade	-	0,005949	0,005966	0,006131	0,005812	0,006014	0,006189	0,006090	0,006211	0,007076	0,008715	0,008018

Fonte: DATASUS

Tabela A.9: Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Paulínia

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total dos óbitos 30+	389	366	387	433	418	431	452	471	460	566	711	582
População 30+	44.446	46.483	48.516	50.540	52.564	54.669	56.724	58.747	60.705	62.587	64.469	65.964
Mortalidade 30+	0,008752	0,007874	0,007977	0,008567	0,007952	0,007884	0,007968	0,008017	0,007578	0,009043	0,011029	0,008823
População	84.512	86.800	92.668	95.221	97.702	100.128	102.499	106.776	109.424	112.003	114.508	110.537
Total dos óbitos	-	410	426	469	448	462	476	508	507	604	750	626
População	-	89.928	92.775	95.624	98.539	101.353	104.064	106.776	109.424	112.003	114.508	110.537
Mortalidade	-	0,004559	0,004592	0,004905	0,004546	0,004558	0,004574	0,004758	0,004633	0,005393	0,006550	0,005663

Fonte: DATASUS

Tabela A.10: Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Rio Claro

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total dos óbitos 30+	1.361	1.384	1.321	1.394	1.436	1.438	1.420	1.477	1.471	1.627	1.974	1.750
População 30+	105.944	108.340	110.761	113.167	115.544	117.883	120.197	122.461	124.659	126.775	128.816	120.199
Mortalidade 30+	0,012846	0,012775	0,011927	0,012318	0,012428	0,012199	0,011814	0,012061	0,011800	0,012834	0,015324	0,014559
População	187.638	188.977	196.821	198.413	199.961	201.473	202.952	204.797	206.424	208.008	209.548	201.418
Total dos óbitos	-	1.474	1.410	1.485	1.506	1.524	1.497	1.543	1.535	1.701	2.070	1.836
População	-	194.446	196.195	197.946	199.737	201.465	203.131	204.797	206.424	208.008	209.548	201.418
Mortalidade	-	0,007581	0,007187	0,007502	0,007540	0,007565	0,007370	0,007534	0,007436	0,008178	0,009878	0,009115

Fonte: DATASUS

Tabela A.11: Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Santa Gertrudes

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total dos óbitos 30+	98	98	80	107	100	112	119	120	129	153	199	135
População 30+	10.737	11.108	11.489	11.865	12.244	12.604	12.959	13.306	13.639	13.963	14.244	14.090
Mortalidade 30+	0,009127	0,008822	0,006963	0,009018	0,008167	0,008886	0,009183	0,009018	0,009458	0,010958	0,013971	0,009581
População	22.074	22.499	23.793	24.272	24.737	25.192	25.637	26.403	26.898	27.381	27.850	23.611
Total dos óbitos	-	110	94	118	109	121	123	127	137	157	206	141
População	-	23.248	23.782	24.315	24.861	25.388	25.895	26.403	26.898	27.381	27.850	23.611
Mortalidade	-	0,004732	0,003953	0,004853	0,004384	0,004766	0,004750	0,004810	0,005093	0,005734	0,007397	0,005972

Fonte: DATASUS

Tabela A.12: Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de Santos

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total dos óbitos 30+	3.761	3.827	3.971	3.879	3.976	4.156	4.057	4.041	4.105	4.843	5.594	4.683
População 30+	264.707	267.823	271.018	274.208	277.310	279.931	282.579	285.146	287.657	290.062	292.086	249.809
Mortalidade 30+	0,014208	0,014289	0,014652	0,014146	0,014338	0,014847	0,014357	0,014172	0,014270	0,016696	0,019152	0,018746
População	419.509	419.614	433.153	433.565	433.966	434.359	434.742	432.957	433.311	433.656	433.991	418.608
Total dos óbitos	-	4.024	4.127	4.036	4.115	4.286	4.172	4.196	4.230	4.954	5.720	4.797
População	-	430.702	431.083	431.464	431.854	432.231	432.594	432.957	433.311	433.656	433.991	418.608
Mortalidade	-	0,009343	0,009574	0,009354	0,009529	0,009916	0,009644	0,009691	0,009762	0,011424	0,013180	0,011459

Fonte: DATASUS

Tabela A.13: Óbitos por residência por região de Saúde (CIR) na cidade de São José do Rio Preto

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total dos óbitos 30+	2.779	2.787	2.843	2.899	2.912	3.052	3.136	3.081	3.287	4.274	5.193	3.770
População 30+	242.026	248.078	254.186	260.268	266.304	272.373	278.357	284.247	289.977	295.506	300.474	286.708
Mortalidade 30+	0,011482	0,011234	0,011185	0,011139	0,010935	0,011205	0,011266	0,010839	0,011335	0,014463	0,017283	0,013149
População	412.076	415.769	434.039	438.354	442.548	446.649	450.657	456.245	460.671	464.983	469.173	480.439
Total dos óbitos	-	2.925	2.992	3.049	3.048	3.187	3.289	3.221	3.429	4.425	5.337	3.933
População	-	428.074	432.836	437.599	442.473	447.177	451.711	456.245	460.671	464.983	469.173	480.439
Mortalidade	-	0,006833	0,006913	0,006968	0,006889	0,007127	0,007281	0,007060	0,007443	0,009516	0,011375	0,008186

Fonte: DATASUS

## APÊNDICE B – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Tabela B.1: Resultados da simulação com o poluente PM<sub>2.5</sub>

	Campinas		Paulínia		Rio Claro		Santa Gertrudes		Santos		São José do Rio Preto	
	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>
	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>
MORTALIDADE												
<i>2019</i>	21	738	0	35	4	151	0	13	0	284	0	239
<i>2020</i>	0	446	0	38	3	155	0	13	0	266	5	370
<i>2021</i>	5	692	2	71	3	180	0	19	0	279	3	419
<i>2022</i>	0	611	0	37	0	129	0	11	0	229	0	231
MÉDIA ANUAL [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]												
<i>2019</i>	19,2590	19,2590	15,3253	15,3253	19,0870	19,0870	18,5176	18,5176	14,3272	14,3272	14,7966	14,7966
<i>2020</i>	12,2496	12,2496	14,1454	14,1454	17,9711	17,9711	16,1306	16,1306	12,3426	12,3426	16,7744	16,7744
<i>2021</i>	15,7324	15,7324	18,6939	18,6939	17,4495	17,4495	18,2020	18,2020	11,6560	11,6560	15,9329	15,9329
<i>2022</i>	14,4188	14,4188	13,6151	13,6151	14,9625	14,9625	15,7645	15,7645	11,5024	11,5024	13,2294	13,2294
POPULAÇÃO CONSIDERADA												
<i>2019</i>	1.204.073	723.877	109.424	60.705	206.424	124.659	26.898	13.639	433.311	287.657	460.671	289.977
<i>2020</i>	1.213.792	736.195	112.003	62.587	208.008	126.775	27.381	13.963	433.656	290.062	464.983	295.506
<i>2021</i>	1.223.237	747.304	114.508	64.469	209.548	128.816	27.850	14.244	433.991	292.086	469.173	300.474
<i>2022</i>	1.139.047	679.740	110.537	65.964	201.418	120.199	23.611	14.090	418.608	249.809	480.439	286.708
PORCENTAGEM (%)												
<i>2019</i>	0,00174	0,10	0,00000	0,06	0,00194	0,12	0,00000	0,10	0,00000	0,10	0,00000	0,08
<i>2020</i>	0,00000	0,06	0,00000	0,06	0,00144	0,12	0,00000	0,09	0,00000	0,09	0,00108	0,13
<i>2021</i>	0,00041	0,09	0,00175	0,11	0,00143	0,14	0,00000	0,13	0,00000	0,10	0,00064	0,14
<i>2022</i>	0,00000	0,09	0,00000	0,06	0,00000	0,11	0,00000	0,08	0,00000	0,09	0,00000	0,08

Fonte: CETESB, IBGE, DATASUS. Tratamento e simulação dos dados de autoria própria utilizando o software *AirQ+*.

Tabela B.2: Resultados da simulação com o poluente PM<sub>10</sub>

	Campinas		Paulínia		Rio Claro		Santa Gertrudes		Santos		São José do Rio Preto	
	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>	<i>Curto</i>	<i>Longo</i>
	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>	<i>Prazo</i>
MORTALIDADE												
<i>2019</i>	0	264	0	26	0	140	0	18	0	111	0	189
<i>2020</i>	0	284	0	25	0	142	0	20	0	243	0	294
<i>2021</i>	0	383	0	42	0	197	1	27	0	184	0	336
<i>2022</i>	0	280	0	30	0	160	0	18	0	165	0	244
MÉDIA ANUAL [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]												
<i>2019</i>	24,6724	24,6724	29,7328	29,7328	40,4826	40,4826	53,2427	53,2427	22,0101	22,0101	30,1059	30,1059
<i>2020</i>	23,9722	23,9722	26,6813	26,6813	38,2841	38,2841	50,8778	50,8778	28,1375	28,1375	33,1849	33,1849
<i>2021</i>	24,7167	24,7167	30,5301	30,5301	41,7935	41,7935	52,0055	52,0055	25,2014	25,2014	34,4521	34,4521
<i>2022</i>	23,3023	23,3023	28,2702	28,2702	39,5137	39,5137	51,1644	51,1644	24,1507	24,1507	32,0571	32,0571
POPULAÇÃO CONSIDERADA												
<i>2019</i>	1.204.073	723.877	109.424	60.705	206.424	124.659	26.898	13.639	433.311	287.657	460.671	289.977
<i>2020</i>	1.213.792	736.195	112.003	62.587	208.008	126.775	27.381	13.963	433.656	290.062	464.983	295.506
<i>2021</i>	1.223.237	747.304	114.508	64.469	209.548	128.816	27.850	14.244	433.991	292.086	469.173	300.474
<i>2022</i>	1.139.047	679.740	110.537	65.964	201.418	120.199	23.611	14.090	418.608	249.809	480.439	286.708
PORCENTAGEM (%)												
<i>2019</i>	0,00000	0,04	0,00000	0,04	0,00000	0,11	0,00000	0,13	0,00000	0,04	0,00000	0,07
<i>2020</i>	0,00000	0,04	0,00000	0,04	0,00000	0,11	0,00000	0,14	0,00000	0,08	0,00000	0,10
<i>2021</i>	0,00000	0,05	0,00000	0,07	0,00000	0,15	0,00359	0,19	0,00000	0,06	0,00000	0,11
<i>2022</i>	0,00000	0,04	0,00000	0,05	0,00000	0,13	0,00000	0,13	0,00000	0,07	0,00000	0,09

Fonte: CETESB, IBGE, DATASUS. Tratamento e simulação dos dados de autoria própria utilizando o software *AirQ+*.

Tabela B.3: Resultados da simulação com o poluente O<sub>3</sub>

	Campinas		Paulínia		Rio Claro		Santa Gertrudes		Santos		São José do Rio Preto	
	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>
MORTALIDADE												
<i>2019</i>	30	69	1	3	4	9	-	-	1	3	7	17
<i>2020</i>	27	63	2	4	7	11	-	-	2	4	1	2
<i>2021</i>	32	75	2	5	4	10	-	-	1	3	0	1
<i>2022</i>	20	47	1	3	3	7	-	-	1	2	6	15
SOMO 35 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]												
<i>2019</i>	3.392,2900	3.392,2900	2.205,0250	2.205,0250	2.058,1900	2.058,1900	-	-	277,9450	277,9450	1.772,4550	1.772,4550
<i>2020</i>	2.683,7100	2.683,7100	2.151,3200	2.151,3200	2.457,4650	2.457,4650	-	-	287,5600	287,5600	141,2750	141,2750
<i>2021</i>	2.595,5050	2.595,5050	2.218,7450	2.218,7450	1.736,8950	1.736,8950	-	-	185,8500	185,8500	88,0300	88,0300
<i>2022</i>	1.901,6850	1.901,6850	1.758,2100	1.758,2100	1.477,2000	1.477,2000	-	-	177,8850	177,8850	1.406,9350	1.406,9350
POPULAÇÃO CONSIDERADA												
<i>2019</i>	1.204.073	1.204.073	109.424	109.424	206.424	206.424	-	-	433.311	433.311	460.671	460.671
<i>2020</i>	1.213.792	1.213.792	112.003	112.003	208.008	208.008	-	-	433.656	433.656	464.983	464.983
<i>2021</i>	1.223.237	1.223.237	114.508	114.508	209.548	209.548	-	-	433.991	433.991	469.173	469.173
<i>2022</i>	1.139.047	1.139.047	110.537	110.537	201.418	201.418	-	-	418.608	418.608	480.439	480.439
PORCENTAGEM (%)												
<i>2019</i>	0,00249	0,01	0,00091	0,00	0,00194	0,00	-	-	0,00023	0,00	0,00152	0,00
<i>2020</i>	0,00222	0,01	0,00179	0,00	0,00337	0,01	-	-	0,00046	0,00	0,00022	0,00
<i>2021</i>	0,00262	0,01	0,00175	0,00	0,00191	0,00	-	-	0,00023	0,00	0,00000	0,00
<i>2022</i>	0,00176	0,00	0,00090	0,00	0,00149	0,00	-	-	0,00024	0,00	0,00125	0,00

Fonte: CETESB, IBGE, DATASUS. Tratamento e simulação dos dados de autoria própria utilizando o software *AirQ+*.

Tabela B.4: Resultados da simulação com o poluente NO<sub>2</sub>

	Campinas		Paulínia		Rio Claro		Santa Gertrudes		Santos		São José do Rio Preto	
	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>	<i>Curto Prazo</i>	<i>Longo Prazo</i>
MORTALIDADE												
<i>2019</i>	0	79	0	10	-	-	1	6	9	143	0	64
<i>2020</i>	0	39	0	11	-	-	1	8	8	241	0	83
<i>2021</i>	0	80	0	11	-	-	2	10	1	166	0	25
<i>2022</i>	0	0	0	10	-	-	0	5	18	184	0	66
MÉDIA ANUAL [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]												
<i>2019</i>	15,6738	15,6738	20,9029	20,9029	-	-	32,6113	32,6113	27,8828	27,8828	19,8566	19,8566
<i>2020</i>	12,4132	12,4132	20,1019	20,1019	-	-	36,4772	36,4772	27,2846	27,2846	19,8457	19,8457
<i>2021</i>	13,9645	13,9645	18,1580	18,1580	-	-	35,3549	35,3549	25,2142	25,2142	12,4427	12,4427
<i>2022</i>	9,9138	9,9138	18,7893	18,7893	-	-	28,5791	28,5791	30,2256	30,2256	18,9643	18,9643
POPULAÇÃO CONSIDERADA												
<i>2019</i>	1.204.073	723.877	109.424	60.705	-	-	433.311	287.657	460.671	289.977	460.671	289.977
<i>2020</i>	1.213.792	736.195	112.003	62.587	-	-	433.656	290.062	464.983	295.506	464.983	295.506
<i>2021</i>	1.223.237	747.304	114.508	64.469	-	-	433.991	292.086	469.173	300.474	469.173	300.474
<i>2022</i>	1.139.047	679.740	110.537	65.964	-	-	418.608	249.809	480.439	286.708	480.439	286.708
PORCENTAGEM (%)												
<i>2019</i>	0,0000	0,0109	0,0000	0,0165	-	-	0,0037	0,0440	0,0021	0,0497	0,0000	0,0221
<i>2020</i>	0,0000	0,0053	0,0000	0,0176	-	-	0,0037	0,0573	0,0018	0,0831	0,0000	0,0281
<i>2021</i>	0,0000	0,0107	0,0000	0,0171	-	-	0,0072	0,0702	0,0002	0,0568	0,0000	0,0083
<i>2022</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0152	-	-	0,0000	0,0355	0,0043	0,0737	0,0000	0,0230

Fonte: CETESB, IBGE, DATASUS. Tratamento e simulação dos dados de autoria própria utilizando o software *AirQ+*.

## REFERÊNCIAS

MANISALIDIS, I.; STAVROPOULOU, E.; STAVROPOULOS, A.; BEZIRTZOGLU, E. Environmental and health impacts of air pollution: A review. **Frontiers in Public Health**, Frontiers Media SA, v. 8, fev. 2020. ISSN 2296-2565. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>>.

SAMET, J.; KREWSKI, D. Health effects associated with exposure to ambient air pollution. **Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A**, Informa UK Limited, v. 70, n. 3–4, p. 227–242, fev. 2007. ISSN 1087-2620. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/15287390600884644>>.

WILSON, W. E.; SUH, H. H. Fine particles and coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies. **Journal of the Air & Waste Management Association**, Informa UK Limited, v. 47, n. 12, p. 1238–1249, dez. 1997. ISSN 2162-2906. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10473289.1997.10464074>>.

NUVOLONE, D.; PETRI, D.; VOLLER, F. The effects of ozone on human health. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer Science and Business Media LLC, v. 25, n. 9, p. 8074–8088, maio 2017. ISSN 1614-7499. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11356-017-9239-3>>.

BONINGARI, T.; SMIRNIOTIS, P. G. Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NO<sub>x</sub> abatement. **Current Opinion in Chemical Engineering**, Elsevier BV, v. 13, p. 133–141, ago. 2016. ISSN 2211-3398. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2016.09.004>>.

KELISHADI, R.; POURSAFA, P. Air pollution and non-respiratory health hazards for children. **Archives of Medical Science**, Termedia Sp. z.o.o., v. 4, p. 483–495, 2010. ISSN 1734-1922. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5114/aoms.2010.14458>>.

United States Environmental Protection Agency. **Particulate Matter (PM) Basics**. 2023. <<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>>. [Acessado em 17-03-2024].

ZHANG, L.; YANG, Y.; LI, Y.; QIAN, Z. M.; XIAO, W.; WANG, X.; ROLLING, C. A.; LIU, E.; XIAO, J.; ZENG, W.; LIU, T.; LI, X.; YAO, Z.; WANG, H.; MA, W.; LIN, H. Short-term and long-term effects of PM 2.5 on acute nasopharyngitis in 10 communities of Guangdong, China. **Science of The Total Environment**, Elsevier BV, v. 688, p. 136–142, out. 2019. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.470>>.

NUSSBAUMER, C. M.; POZZER, A.; TADIC, I.; RÖDER, L.; OBERSTEINER, F.; HARDER, H.; LELIEVELD, J.; FISCHER, H. Tropospheric ozone production and chemical regime analysis during the COVID-19 lockdown over Europe. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus GmbH, v. 22, n. 9, p. 6151–6165, maio 2022. ISSN 1680-7324. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5194/acp-22-6151-2022>>.

GRYPARIS, A.; FORSBERG, B.; KATSOUYANNI, K.; ANALITIS, A.; TOULOUMI, G.; SCHWARTZ, J.; SAMOLI, E.; MEDINA, S.; ANDERSON, H. R.; NICIU, E. M.; WICHMANN, H.-E.; KRIZ, B.; KOSNIK, M.; SKORKOVSKY, J.; VONK, J. M.; DÖRTBUDAK, Z. Acute effects of ozone on mortality from the “air pollution and health: A european approach” project. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, American Thoracic Society, v. 170, n. 10, p. 1080–1087, nov. 2004. ISSN 1535-4970. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1164/rccm.200403-333OC>>.

FARES, S.; VARGAS, R.; DETTO, M.; GOLDSTEIN, A. H.; KARLIK, J.; PAOLETTI, E.; VITALE, M. Tropospheric ozone reduces carbon assimilation in trees: estimates from analysis of continuous flux measurements. **Global Change Biology**, Wiley, v. 19, n. 8, p. 2427–2443, maio 2013. ISSN 1365-2486. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12222>>.

EMBERSON, L. D.; PLEIJEL, H.; AINSWORTH, E. A.; BERG, M. van den; REN, W.; OSBORNE, S.; MILLS, G.; PANDEY, D.; DENTENER, F.; BÜCKER, P.; EWERT, F.; KOEBLE, R.; DINGENEN, R. V. Ozone effects on crops and consideration in crop models. **European Journal of Agronomy**, Elsevier BV, v. 100, p. 19–34, out. 2018. ISSN 1161-0301. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.002>>.

CETESB. Qualidade do ar no estado de São Paulo. CETESB, 2022. ISBN 978-65-5577-058-2. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2022. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>.

PLURIS, L. S. A diversidade da indústria e as desigualdades no território: uma análise da região metropolitana de Campinas. In: **9º Congresso Luso-Brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável**. [S.l.: s.n.], 2020.

VIEIRA, P. H. Análise histórica do polo cerâmico de Santa Gertrudes/SP: sua relevância no município de Cordeirópolis/SP. **Revista Geoaraguaia**, v. 12, n. 1, p. 157–175, jul. 2022. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/10094>>.

SAMPAIO, S. S. A industrialização de Rio Claro: contribuição ao estudo da desconcentração espacial da indústria no estado de São Paulo. In: . [s.n.], 1987. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128227927>>.

FRANCISCO, A. M. Contribuição à história da urbanização de São José do Rio Preto - SP. **Revista Tópos**, v. 5, n. 1, p. 119–142, maio 2013. Disponível em: <<https://revista.fct.unesp.br/index.php/topos/article/view/2274>>.

FILHO, H. D. P.; RIGHI, R. O desenvolvimento urbano da cidade de Santos: o local, o regional e o nacional em 400 anos de história. In: \_\_\_\_\_. **XII Seminário Internacional de Investigación en Urbanismo, São Paulo-Lisboa, 2020**. Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2117/336593>>.

GENEVA: WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. **WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM 2.5, PM 10, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide)**. [S.l.], 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

COPENHAGEN: WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. **Health impact assessment of air pollution: introductory manual to AirQ+**. [S.l.], 2020. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

NAGHAN, D. J.; NEISI, A.; GOUDARZI, G.; DASTOORPOOR, M.; FADAEI, A.; ANGALI, K. A. Estimation of the effects PM 2.5, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> pollutants on the health of Shahrekord residents based on AirQ+ software during (2012–2018). **Toxicology Reports**, Elsevier BV, v. 9, p. 842–847, 2022. ISSN 2214-7500. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.03.045>>.

GHOZIKALI, M. G.; MOSAFERI, M.; SAFARI, G. H.; JAAFARI, J. Effect of exposure to O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> on chronic obstructive pulmonary disease hospitalizations in Tabriz, Iran. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer Science and Business Media LLC, v. 22, n. 4, p. 2817–2823, set. 2014. ISSN 1614-7499. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-3512-5>>.

KRZYZANOWSKI, M. Methods for assessing the extent of exposure and effects of air pollution. **Occupational and Environmental Medicine**, BMJ, v. 54, n. 3, p. 145–151, mar. 1997. ISSN 1351-0711. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1136/oem.54.3.145>>.

COPENHAGEN: WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. **Health impact assessment of air pollution: AirQ+ life table manual**. [S.l.], 2020. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.