



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM BELO HORIZONTE NO PERÍODO DA
PANDEMIA DA COVID-19**

Victor Hugo de Araújo

Belo Horizonte

2025

Victor Hugo de Araújo

**ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM BELO HORIZONTE NO PERÍODO DA
PANDEMIA DA COVID-19**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientadora: Prof^a. Dra. Adriana Alves Pereira Wilken

Belo Horizonte

2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA
FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC

VICTOR HUGO DE ARAÚJO

ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM BELO HORIZONTE NO PERÍODO DA
PANDEMIA DA COVID-19

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Ambiental e
Sanitarista.

Aprovado em 13 de fevereiro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Adriana Alves Pereira Wilken – Presidente da Banca Examinadora
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG - Orientadora

Prof. Dr. Tiago Borges Ferreira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

Prof. Dra. Patrícia Sueli de Rezende
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, por me proporcionar uma criação irretocável, na qual os estudos sempre foram incentivados. Em especial, ao meu pai, Nedney e à minha mãe, Gisele, por todo o apoio durante essa trajetória e por sempre acreditarem em mim. Aos meus irmãos, Gustavo e Gabriel, que são partes inseparáveis de quem eu sou. Não poderia deixar de mencionar meus tios, tias e minha avó Lica, que, independentemente de onde esteja, sei que posso contar com seu apoio e boas energias.

À minha orientadora, Adriana Wilken, pela orientação, pelos ensinamentos e por todo o apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha primeira orientadora, Daniela Bonfim, que, infelizmente, teve seu contrato encerrado durante essa jornada, mas foi peça fundamental para a realização deste último ato como graduando. Agradeço por todo o apoio, paciência e ensinamentos.

Aos meus amigos, por tornarem este período mais leve, equilibrando o esforço necessário para se graduar em uma das melhores instituições do Brasil com momentos de diversão e risadas.

A todos os professores do CEFET-MG com quem tive contato, especialmente aos do Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, por todo o conhecimento e experiência compartilhados.

Por fim, à própria instituição, CEFET-MG, por possibilitar minha formação profissional e me proporcionar diversas oportunidades de desenvolvimento intelectual e pessoal.

RESUMO

ARAÚJO, Victor Hugo de. **Análise da qualidade do ar em Belo Horizonte no período da pandemia da COVID-19**. 2025. 63 páginas. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

Este trabalho avaliou a qualidade do ar de Belo Horizonte entre 2020 e 2022, para compreender o impacto das medidas de isolamento social adotadas durante a pandemia da COVID-19 na qualidade do ar da cidade. Foram estudados os dados de monitoramento dos poluentes MP₁₀, MP_{2,5}, NO₂, O₃, SO₂ e CO provenientes de três estações automáticas de monitoramento de qualidade do ar (Centro, PUC Barreiro e PUC São Gabriel).

Os resultados indicaram que a maior parte das concentrações dos poluentes estavam em conformidade com os padrões vigentes da Resolução CONAMA nº 506/2024. As menores concentrações de poluentes não seguiram um padrão uniforme, variando entre 2020 e 2022 conforme a estação. No geral, em 2022 observou-se menores concentrações de O₃, enquanto o material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}) teve menores valores em 2020, exceto na Estação Centro, na qual as concentrações de MP₁₀ não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre os anos de 2020 e 2022.

O estudo também revelou que 2021 foi o ano com maiores concentrações medianas de poluentes, sugerindo que outros fatores, como condições meteorológicas e dinâmicas locais, influenciaram a qualidade do ar mais do que as medidas de distanciamento social. Assim, conclui-se que as variações observadas nas concentrações de poluentes não podem ser atribuídas exclusivamente às políticas de isolamento social, mas a qualidade do ar em Belo Horizonte mostrou-se satisfatória no período analisado, com conformidade elevada aos padrões estabelecidos.

Palavras-chave: Monitoramento automático de qualidade do ar. Belo Horizonte. Pandemia da COVID-19.

ABSTRACT

ARAÚJO, Victor Hugo de. **Analysis of air quality in Belo Horizonte during the COVID-19 pandemic**. 2025. 63 pages. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

This study evaluated the air quality in Belo Horizonte between 2020 and 2022 to understand the impact of social isolation measures adopted during the COVID-19 pandemic on the city's air quality. Data from the monitoring of pollutants MP10, MP2.5, NO₂, O₃, SO₂, and CO from three automatic air quality monitoring stations (Centro, PUC Barreiro, and PUC São Gabriel) were analyzed.

The results indicated that most pollutant concentrations complied with the standards set by CONAMA Resolution No. 506/2024. The lowest pollutant concentrations did not follow a uniform pattern, varying between 2020 and 2022 depending on the station. In general, lower O₃ concentrations were observed in 2022, while particulate matter (MP10 and MP2.5) had lower values in 2020, except at the Centro Station, where MP10 concentrations showed no statistically significant difference between 2020 and 2022.

The study also revealed that 2021 had the highest median concentrations of pollutants, suggesting that other factors, such as meteorological conditions and local dynamics, influenced air quality more than social distancing measures. Thus, it is concluded that the variations observed in pollutant concentrations cannot be attributed exclusively to isolation policies. However, air quality in Belo Horizonte was found to be satisfactory during the analyzed period, with a high level of compliance with the established standards.

Keywords: Automatic air quality monitoring. Belo Horizonte. COVID-19 pandemic.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Qualidade do Ar.....	15
3.2	Poluentes Atmosféricos	16
3.3	Padrões de qualidade do ar	17
3.4	Monitoramento da qualidade do ar.....	19
3.5	Influências ambientais e biológicas na qualidade do ar	20
<i>3.5.1</i>	<i>Fontes naturais de poluentes</i>	<i>20</i>
<i>3.5.2</i>	<i>Clima e condições meteorológicas.....</i>	<i>20</i>
<i>3.5.3</i>	<i>Topografia, uso do solo e urbanização</i>	<i>20</i>
<i>3.5.4</i>	<i>Microrganismos atmosféricos</i>	<i>21</i>
3.6	Pandemia da Covid-19 e influência na qualidade do ar	21
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
4.1	Área de estudo e obtenção de dados.....	23
4.2	Tratamento dos dados e análise estatística	24
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1	Dispersão das concentrações dos poluentes e padrões de qualidade do ar	28
5.2	Comparação das concentrações dos poluentes	36
6.	CONCLUSÕES	57
7.	RECOMENDAÇÕES	59
8.	REFERÊNCIAS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Padrões da qualidade do ar da Resolução CONAMA nº 506/2024.....	18
Figura 4.1 – Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar em Belo Horizonte.....	23
Figura 5.1 – Gráfico de dispersão com a média diária da variável MP_{10} nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).....	29
Figura 5.2 – Gráfico de dispersão com a média diária da variável $MP_{2,5}$ nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).....	30
Figura 5.3 – Gráfico de dispersão com a média diária da variável SO_2 nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).....	31
Figura 5.4 – Gráfico de dispersão com o máximo diário da variável NO_2 nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).....	32
Figura 5.5 – Gráfico de dispersão com o máximo da média móvel de 8 horas da variável O_3 nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).....	33
Figura 5.6 – Gráfico de dispersão com o máximo da média móvel de 8 horas da variável CO nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).....	34
Figura 5.7 – Boxplot da variável MP_{10} pela variável ano da Estação Centro.....	37
Figura 5.8 – Boxplot da variável $MP_{2,5}$ pela variável ano da Estação Centro.....	37
Figura 5.9 – Boxplot da variável NO_2 pela variável ano da Estação Centro.....	38
Figura 5.10 – Boxplot da variável O_3 pela variável ano da Estação Centro.....	38
Figura 5.11 – Boxplot da variável SO_2 pela variável ano da Estação Centro.....	39
Figura 5.12 – Boxplot da variável CO pela variável ano da Estação Centro.....	39
Figura 5.13 – Boxplot da variável MP_{10} pela variável ano da Estação PUC Barreiro.....	43
Figura 5.14 – Boxplot da variável $MP_{2,5}$ pela variável ano da Estação PUC Barreiro.....	43
Figura 5.15 – Boxplot da variável NO_2 pela variável ano da Estação PUC Barreiro.....	44
Figura 5.16 – Boxplot da variável O_3 pela variável ano da Estação PUC Barreiro.....	44

Figura 5.17 – Boxplot da variável SO ₂ pela variável ano da Estação PUC Barreiro.....	45
Figura 5.18 – Boxplot da variável CO pela variável ano da Estação PUC Barreiro.....	45
Figura 5.19 – Boxplot da variável MP ₁₀ pela variável ano da Estação PUC São Gabriel....	49
Figura 5.20 – Boxplot da variável MP _{2,5} pela variável ano da Estação PUC São Gabriel...	49
Figura 5.21 – Boxplot da variável NO ₂ pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.....	50
Figura 5.22 – Boxplot da variável O ₃ pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.....	50
Figura 5.23 – Boxplot da variável SO ₂ pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.....	51
Figura 5.24 – Boxplot da variável CO pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Tabela de porcentagem de atendimento ao Padrão intermediário I (PI-1) da Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024.....	35
Tabela 5.2 – Tabela de porcentagem de atendimento ao padrão final (PF) da Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024.....	35
Tabela 5.3 – Valores de mediana dos poluentes monitorados na Estação Centro, separados por ano e resultados (p-valor) dos testes de Wilcoxon com correção de Holm para cada combinação de anos possíveis.....	40
Tabela 5.4 – Estatística descritiva das concentrações dos poluentes atmosféricos monitorados na Estação Centro.....	41
Tabela 5.5 – Valores de mediana dos poluentes monitorados na Estação PUC Barreiro, separados por ano e resultados (p-valor) dos testes de Kruskal-Wallis ou Wilcoxon com correção de Holm para cada combinação de anos possíveis.....	46
Tabela 5.6 – Estatística descritiva das concentrações dos poluentes atmosféricos monitorados na Estação PUC Barreiro.....	47
Tabela 5.7 – Valores de mediana dos poluentes monitorados na Estação PUC São Gabriel, separados por ano e resultados (p-valor) dos testes de Wilcoxon com correção de Holm para cada combinação de anos possíveis.....	52
Tabela 5.8 – Estatística descritiva das concentrações dos poluentes atmosféricos monitorados na Estação PUC São Gabriel.....	53
Tabela 5.9 – Resumo das maiores e menores concentrações medianas dos poluentes nas Estações Centro, PUC Barreiro e PUC São Gabriel.....	55

1. INTRODUÇÃO

Em dezembro de 2019 foram relatados alguns casos de insuficiência respiratória grave na cidade de Wuhan, na China, sendo classificados posteriormente como uma nova doença, chamada popularmente de Covid-19 (Konda et al., 2020). A Doença por Coronavírus (*corona virus disease*, em inglês) é causada pelo vírus SARS-CoV-2 levando a um quadro clínico que varia de infecções assintomáticas a condições respiratórias graves (Macintyre; Chugthai, 2020). Devido à rápida propagação global desse novo vírus, em março de 2020 foi declarada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) situação de pandemia, segundo a Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS, 2021).

A Covid espalhou-se rapidamente, infectando uma parcela considerável da população mundial, chegando a mais de 650 milhões de casos em pouco mais de um ano, segundo levantamento da universidade de medicina Johns Hopkins (2023), dos Estados Unidos (John Hopkins, 2023). Os vírus SARS-CoV-2 têm forma geral esférica com diâmetros variando de 60 a 140 nm e apresentam picos de 9 a 12 nm em suas superfícies. Os aerossóis produzidos por pessoas doentes podem conter pedaços de material genético do vírus, que podem facilmente flutuar no ar, sendo essa rota significativa de infecção por vírus (Mallakpour; Azadi; Hussain, 2021). Majoritariamente, pandemias surgem a partir de infecções respiratórias, pois a transmissão é eficaz, além de serem potencializadas em ambientes fechados e aglomerados. Tal característica fez com que, rapidamente, todo o planeta fosse afetado pelo vírus SARS-CoV-2 (Zhu et al., 2020)

No estado de Minas Gerais, o Decreto nº 113, de 12 março de 2020, declarou situação de emergência em saúde pública, decorrente do surto da Covid-19 (Minas Gerais, 2020). A partir disso os municípios começaram a tomar medidas governamentais a fim de frear a proliferação da doença, dentre elas o isolamento social, que é a prática de limitar interações sociais e físicas com outras pessoas ou grupos, visando reduzir a disseminação de doenças ou preservar a segurança individual em situações específicas. O isolamento, também chamado de *lockdown*, foi proposto pela primeira vez na capital mineira em 18 de março de 2020, por meio do decreto nº 17.304, o qual paralisou o comércio e outras atividades consideradas não essenciais (Minas Gerais, 2020).

As medidas de isolamento social no Brasil reduziram a circulação de veículos, especialmente nos grandes centros urbanos, onde a concentração é maior. Dados da Fundação Instituto de Administração (FIA) mostram que cerca de 46% das empresas adotaram o trabalho remoto nesse período, o que também ajudou a diminuir o tráfego urbano (FIA, 2020).

Nas regiões metropolitanas, os veículos automotores, enquadrados nas fontes móveis, são os principais responsáveis pela degradação da qualidade do ar, segundo a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM, 2023a). A queima de combustíveis fósseis por parte dos veículos automotores, como a gasolina ou o diesel, emitem diversas substâncias nocivas à saúde humana e ao meio ambiente, por exemplo, o monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x), hidrocarbonetos, dentre outros. Tais fontes são classificadas como móveis, já que não têm um ponto de lançamento específico ou não advêm de um ponto preciso de geração. Apesar dos múltiplos avanços tecnológicos que reduziram os impactos das emissões, o grande número de veículos gera um dano expressivo quando considerado em sua totalidade (FEAM, 2023a).

Atualmente, em função da crescente preocupação com o meio ambiente, cresce também a necessidade de avaliar os impactos reais e potenciais gerados a partir da poluição ambiental.

Segundo a Resolução nº 506, de 05 de julho de 2024, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), a poluição atmosférica ocorre quando há a inserção de matéria no meio, de modo em que o ar possa tornar-se impróprio, nocivo à saúde, cause danos à fauna e a flora ou afete o funcionamento habitual da sociedade. Para isso, a Resolução determina padrões de qualidade do ar a serem seguidos, limitando concentrações de poluentes relevantes (Brasil, 2024). O monitoramento da qualidade do ar é realizado para determinar o nível de concentração de um grupo de poluentes universalmente consagrados como indicadores, selecionados devido à sua maior frequência de ocorrência na atmosfera, assim como pelos efeitos adversos que causam ao meio ambiente e à saúde da população (FEAM, 2023b).

Em Minas Gerais, o monitoramento dos poluentes atmosféricos é realizado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), por meio de estações automáticas que registram as concentrações dos poluentes que possuem padrões definidos pela Resolução nº 506, de 05 de julho de 2024 do CONAMA, a cada intervalo de uma hora (FEAM, 2023d). A partir das informações obtidas no monitoramento, é possível expressar o índice de qualidade do ar (IQA_r),

que, através de funções matemáticas, transforma os dados quantitativos em resultados qualitativos sobre a qualidade do ar em determinado momento. A região de Belo Horizonte é monitorada por cinco estações, alocadas em diferentes regiões de grande circulação na cidade, são elas: Estação Centro – Avenida do Contorno, Estação Cidade Administrativa Minas Gerais, Estação Delegacia Amazonas, Estação PUC Barreiro e Estação PUC São Gabriel. Além dessas unidades, também há o monitoramento na região metropolitana e em algumas regiões específicas do estado de Minas Gerais (FEAM, 2023d).

Existem publicações que avaliam os efeitos das medidas de distanciamento social durante a pandemia da Covid-19 na qualidade do ar, em diferentes cidades ao redor do mundo. Um estudo feito por Silva, Branco e Sousa (2022) revisou 114 estudos sobre o tema, incluindo todos os continentes, sendo que os resultados foram semelhantes em todos eles, apresentando uma melhora na qualidade do ar no período de isolamento. Entretanto, não existem, até o momento, estudos que focam especificamente em Belo Horizonte, uma cidade cuja geografia e padrões de mobilidade urbana possuem características que podem influenciar de maneira particular as concentrações de poluentes atmosféricos, avaliando todo o período de pandemia. A única pesquisa identificada foi realizada pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), que analisou dados sobre a qualidade do ar entre os dias 20 de março e 20 de abril dos anos de 2019 e 2020 (Lovisi, 2020). A presente pesquisa visa preencher essa lacuna, avaliando os dados de monitoramento da qualidade do ar em Belo Horizonte durante a pandemia, ou seja, entre os anos de 2020 e 2022, comparando as concentrações dos poluentes entre os anos mencionados.

O objetivo é avaliar se houve uma diminuição significativa nos níveis de poluição atmosférica em função das medidas de distanciamento social, considerando especialmente a redução no tráfego de veículos. Os resultados desta pesquisa buscarão oferecer uma contribuição adicional ao debate sobre os impactos das políticas de contenção comunitária e sua relação com a qualidade do ar em áreas urbanas densamente povoadas, com foco em Belo Horizonte. Assim, será possível discutir as variações na qualidade do ar e comparar os resultados com outros estudos realizados sobre o tema, destacando as particularidades do caso de Belo Horizonte.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar os efeitos das medidas de distanciamento social durante a pandemia da Covid-19 (anos de 2020 a 2022) na qualidade do ar do município de Belo Horizonte.

2.2 Objetivos específicos

- I- Avaliar a qualidade do ar no município em relação ao atendimento aos padrões definidos na Resolução CONAMA nº 506/2024.
- II- Comparar as concentrações médias de poluentes atmosféricos monitorados a cada ano no período estudado.
- III- Verificar se as políticas de isolamento influenciaram nas concentrações de poluentes atmosféricos no município.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Qualidade do Ar

Ter a qualidade do ar em condições impróprias impacta não somente a saúde humana, mas também o meio ambiente de forma ampla. Por exemplo, pode contribuir para modificações climáticas, como o aumento da ocorrência de fenômenos extremos. Além disso, problemas como chuvas ácidas, que resultam da combinação de poluentes com a umidade atmosférica, afetam ecossistemas e infraestrutura. O ozônio troposférico, outro poluente, é responsável por reduzir a produtividade agrícola e prejudicar a vegetação nativa, entre outros danos ambientais (Simoni et al., 2021).

Pode-se dizer que a preocupação com a qualidade do ar ganhou mais força no Brasil com o estabelecimento do Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR), através da Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989 (Brasil, 1989). O PRONAR visou criar diretrizes para prevenir e controlar a poluição atmosférica, estabelecendo padrões de qualidade do ar e promovendo ações para a melhoria da qualidade ambiental. No ano de 2005 a OMS definiu valores recomendados globalmente para a qualidade do ar, porém, desde então, surgiram novas evidências que indicam uma vulnerabilidade da saúde humana, mesmo em concentrações menores de poluentes, exigindo que tais padrões fossem atualizados em 2021 (OPAS, 2021).

De acordo com dados da plataforma *AirVisual*, operada pela empresa suíça *IQAir*, em 2022 o Brasil foi o país nº 81 de 131 no ranking dos mais poluídos do mundo. A cidade de Acrelândia, no Acre, foi apontada como a mais poluída do país, seguida de Porto Velho e Senador Guiomard. Isso ocorreu porque são cidades localizadas em regiões com intenso desmatamento e queimadas. Belo Horizonte, com sua alta densidade populacional e desenvolvimento econômico/industrial, ocupou o 55º lugar da lista e apresentou qualidade do ar considerada moderada (IQAir, 2022).

3.2 Poluentes Atmosféricos

A Resolução CONAMA nº 506, de 05 de julho de 2024 define como poluente atmosférico:

Qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que torne ou possa tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade (Brasil, 2024).

Os poluentes podem ser classificados como primários, quando emitidos diretamente das fontes poluidoras, ou secundários, quando surgem na atmosfera por meio de reações químicas que resultam da interação entre poluentes primários e/ou elementos naturais da atmosfera (Simoni et al., 2021).

As indústrias e os veículos automotores representam as principais fontes de poluição do ar, devido, principalmente, à queima de combustíveis fósseis. Mesmo com o enorme avanço tecnológico nos últimos anos, que potencializa o processo de combustão completa, nos centros urbanos os veículos expressam a maior contribuição nas emissões (Santos et al., 2021). Em relação aos poluentes atmosféricos, destacam-se aqueles que são encontrados com maior frequência, como o CO e CO₂, os SO_x e os NO_x, o ozônio (O₃), os compostos orgânicos voláteis (COVs) e o material particulado (MP).

De acordo com Braga et al. (2005) o MP pode ser definido como qualquer partícula suspensa na atmosfera, como poeira, pólen ou fuligem, e ocorre por diversos motivos, naturais e antrópicos. O MP é categoricamente separado por seu tamanho, ou seja, o diâmetro da partícula em suspensão, dado que quanto menor a partícula, maior sua capacidade de infiltrar nos organismos vivos e, portanto, maior o dano (San Martin; San Martin, 2020). Vários pesquisadores relacionam os efeitos da inalação do MP às complicações graves, incluindo câncer no sistema respiratório, agravamento de sintomas de asma, dentre outros, podendo chegar à morte em alguns casos. Os problemas decorrentes de infecções respiratórias afetam negativamente a qualidade de vida e são os principais fatores que causam mortes prematuras no mundo, quando o assunto é poluição atmosférica (Noel; Vanroelen; Gadeyne, 2021).

O dióxido de enxofre (SO₂) é um poluente resultante da queima de combustíveis fósseis como diesel, carvão e petróleo. Na temperatura ambiente, é um gás tóxico e incolor. Esse poluente pode ocasionar a corrosão de metais e chuvas ácidas, uma vez que, em contato com o oxigênio atmosférico, pode originar o trióxido de enxofre que, em contato com a umidade, gera o ácido

sulfúrico. Quando exposto ao organismo humano, o SO₂ tem potencial de agravar doenças cardíacas, pulmonares e respiratórias (San Martin e San Martin, 2020).

Assim como o SO₂, o CO é um gás incolor e tóxico. Sua emissão está associada a combustões incompletas, que ocorrem quando há uma escassez de oxigênio no processo. Por este motivo, a maior concentração desse poluente é encontrada nos centros urbanos, em locais de intensa movimentação de veículos (Guimarães 2011, *apud* San Martin e San Martin, 2020). O CO é um gás com elevada toxicidade, haja visto os diversos relatos de mortes no mundo ao permanecer dentro de um veículo ligado em ambientes fechados. Ao inalar uma certa quantidade desse gás a oxigenação do sangue é comprometida, podendo causar náuseas, desmaios e agravamento de doenças vasculares (San Martin; San Martin, 2020).

Diferentemente dos demais poluentes, o O₃ troposférico necessariamente não é emitido por alguma fonte direta, sendo um poluente secundário. Sua formação ocorre através de reações fotoquímicas com dióxido de nitrogênio (NO₂) e COV's (Braga et al., 2005). Sua presença é natural e desejável na estratosfera, desempenhando o papel fundamental de absorver a radiação solar. Porém, em camadas mais próximas da superfície, o O₃ tem efeito negativo, devido ao alto poder oxidativo, sendo tóxico à vegetação e causando problemas respiratórios, pulmonares e cardiovasculares nos humanos (Braga et al., 2005).

Por fim, o dióxido de nitrogênio (NO₂) é um dos principais poluentes que propiciam a formação do O₃ troposférico. Origina-se, principalmente, tanto de emissões de processos industriais quanto das emissões de veículos automotores. Os NO_x, grupo de poluentes representados principalmente pelo NO e NO₂, geralmente advêm de processos de combustão, sendo os veículos os maiores influenciadores das concentrações desse poluente na atmosfera (Braga et al., 2005; San Martin e San Martin, 2020). O NO₂ pode provocar problemas pulmonares, de acordo com o grau de sensibilidade. Além disso, pode ocasionar a formação de chuvas ácidas. Geralmente, fica próximo à fonte e é mais facilmente identificável, tanto por sua coloração em tom castanho quanto pelo forte odor (San Martin; San Martin, 2020).

3.3 Padrões de qualidade do ar

O processo de desenvolvimento de um país, na maior parte dos casos, gera como consequência um aumento na poluição gerada, seja no ar, no solo, nos corpos hídricos, ou em todas as esferas ambientais, no geral. Com o objetivo de alinhar o crescimento econômico com a preservação

da qualidade ambiental, o CONAMA criou o PRONAR, a partir da Resolução nº 05/1989 (Brasil, 1989). Como resultado da implementação desse Programa, foram estabelecidos os primeiros padrões de qualidade do ar no Brasil, a partir da Resolução CONAMA nº 03 de 28 de junho de 1990 do CONAMA (Brasil, 1990). Atualmente os padrões de qualidade do ar no Brasil são definidos pela Resolução CONAMA nº 506, de 05 de julho de 2024, como mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Padrões da qualidade do ar da Resolução CONAMA nº 506/2024.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PF	
		µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	ppm
Material Particulado - MP10	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual ¹	40	35	30	20	15	-
Material Particulado - MP2,5	24 horas	60	50	37	25	15	-
	Anual ¹	20	17	15	10	5	-
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	125	50	40	40	40	-
	Anual ¹	40	30	20	20	20	-
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora ²	260	240	220	200	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	10	-
Ozônio - O ₃	8 horas ³	140	130	120	100	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual ¹	40	35	30	20	15	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	-	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	-	0,5	-
1 - média aritmética anual							
2 - máxima média horária obtida no dia							
3 - máxima média móvel obtida no dia							
4 - média geométrica anual							
5 - medido nas partículas totais em suspensão							

Legenda: PI - Padrão intermediário; PF – Padrão Final; ppm – Parte por Milhão; µg/m³ - Microgramas por metro cúbico.

Fonte: Brasil (2024).

Entre 2020 e 2022, a legislação vigente sobre padrões de qualidade do ar no Brasil era a Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, que estabelecia o Padrão Intermediário I (PI-1) como referência. Esse padrão, por sua vez, coincide com o Padrão Intermediário I (PI-1) definido na nova Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024, indicando uma continuidade nos limites estabelecidos para a qualidade do ar entre as normativas (Brasil, 2018; Brasil, 2024)

A Resolução CONAMA nº 506/2024 determina o atendimento aos padrões de qualidade do ar intermediários (PI) e, ao decorrer do tempo, o atendimento aos demais níveis subsequentes, até chegar aos padrões finais (PF), que contemplam os valores definidos pela OMS em 2021. O avanço entre as categorias foi estabelecido da seguinte forma: os padrões estabelecidos pelo PI-2 entrarão em vigor a partir de 1º de janeiro de 2025, devendo ser substituídos pelo PI-3 em 1º de janeiro de 2033. Os padrões determinados pelo PI-4 devem entrar em vigor a partir de 2044 e, finalmente, os PF deverão ser adotados em data a ser determinada pelo CONAMA (Brasil, 2024).

Para melhorar a qualidade do ar em Minas Gerais, a FEAM está desenvolvendo o Plano de Controle de Emissões Atmosféricas (PCEA). Este Plano será uma ferramenta para gestão da qualidade do ar com abrangência geográfica, com definição de novas metas de redução de poluição, identificação de fontes poluentes e definição de um plano de ação para controle e redução das emissões provenientes dessas fontes, tudo isso somando aos padrões já estabelecidos pelos demais órgãos (FEAM, 2023c).

3.4 Monitoramento da qualidade do ar

A Resolução CONAMA nº 506/2024 indica que o monitoramento/medição da qualidade do ar deve ser feito pelos órgãos ambientais estaduais ou distritais de cada local. No caso de Minas Gerais, essa atividade é responsabilidade da FEAM, que realiza o monitoramento contínuo da qualidade do ar, a partir de estações fixas instaladas em locais estratégicos, como avenidas de tráfego intenso ou áreas industriais. Os dados coletados são enviados e validados pela equipe técnica da Gerência de Monitoramento da Qualidade do Ar e Emissões (GESAR) (FEAM, 2023d).

O monitoramento da qualidade do ar em Belo Horizonte é feito através de estações automáticas, nas quais são monitorados os poluentes com padrões estabelecidos por legislação, que são o material particulado inalável (MP₁₀), o material particulado fino (MP_{2,5}), o NO₂, o O₃, o SO₂ e o CO, de acordo com os padrões de qualidade do ar. Os dados do monitoramento contínuo são disponibilizados em planilhas eletrônicas, com medições intervaladas de hora em hora. Além disso, a FEAM também divulga diariamente o boletim da qualidade do ar, um documento mais acessível para a população em geral, que transforma esses dados em índices qualitativos. Em casos de índices de qualidade moderada ou inferior, são alertados os possíveis sintomas que os poluentes em questão podem causar, de acordo com a concentração medida. Por fim, são

publicados pelo órgão os relatórios anuais de qualidade do ar, apresentando um panorama geral da qualidade do ar do estado de Minas Gerais, a partir dos dados monitorados de um ano base (FEAM, 2015).

3.5 Influências ambientais e biológicas na qualidade do ar

No contexto da qualidade do ar, os fatores ambientais referem-se às condições e elementos presentes no meio ambiente que influenciam na composição e pureza do ar. Esses fatores podem afetar a dispersão de poluentes, conseqüentemente aumentando a concentração nos locais de emissão e depreciando a qualidade do ar (Santos; Carvalho; Reboita, 2016). Dentre os principais fatores ambientais, temos:

3.5.1 Fontes naturais de poluentes

Várias formas de poluição podem acontecer naturalmente, por exemplo, incêndios florestais, vapores naturais, polinização e a própria poeira levada pelo vento a partir de processos erosivos. Contudo, são as fontes antropogênicas que depreciam de modo mais expressivo a qualidade do ar (INCA, 2022).

3.5.2 Clima e condições meteorológicas

Esses dois parâmetros são fundamentais na determinação da qualidade do ar, pois parâmetros de direção e intensidade dos ventos, temperatura e precipitação estão diretamente relacionados com a dispersão de poluentes, um fenômeno natural no qual as substâncias lançadas no ar são deslocadas e diluídas pela atmosfera (Braga, 2005). Por exemplo, temperaturas elevadas somadas à baixa umidade relativa do ar propiciam uma maior concentração de ozônio (Carvalho et al., 2004; Lyra et al., 2006; apud Santos; Carvalho; Reboita, 2016).

3.5.3 Topografia, uso do solo e urbanização

Assim como o aspecto anterior, a topografia também tem grande influência na dispersão de poluentes. As regiões metropolitanas, devido à existência de edifícios, podem apresentar maior dificuldade de dispersão dos elementos nocivos. Parâmetros como topografia acidentada e ocupação do solo podem afetar negativamente a qualidade do ar de uma região (Carvalho et al., 2004; Guerra et al., 2011; apud Santos; Carvalho; Reboita, 2016).

3.5.4 *Microrganismos atmosféricos*

Os microrganismos, que também podem ser transportados pelo ar, estão enquadrados nos fatores ambientais de poluição. Eles também podem se enquadrar na classe de fatores biológicos. A inalação de microrganismos pode causar irritações, alergias e outras doenças, principalmente, respiratórias (Quadros et al., 2009). O SARS-CoV-2, vírus responsável por causar a Covid-19, é um exemplo de microrganismo atmosférico (Macintyre; Chughthai, 2020).

3.6 **Pandemia da Covid-19 e influência na qualidade do ar**

A facilidade de dispersão do SARS-CoV-2 pelo ar, vírus responsável pela doença Covid-19, foi uma característica crucial para a rápida propagação do vírus e por elevar a doença ao patamar de pandemia. Devido ao pequeno tamanho das partículas virais presentes nos aerossóis, essas partículas conseguem permanecer suspensas no ar por longos períodos de tempo, aumentando o poder de contaminação da doença (Reinhardt, 2022).

A pandemia da Covid-19 fez com que medidas de distanciamento social fossem propostas em grande parte do mundo. Uma consequência imprevista foi a melhora da qualidade do ar em proporções globais. Segundo o estudo feito por Liu, Wang e Zheng (2020), que avaliou os efeitos do isolamento da Covid-19 na qualidade do ar e na saúde global, os níveis dos poluentes diminuíram consideravelmente entre janeiro e julho de 2020. Dentre os poluentes analisados, o NO₂ apresentou uma queda entre 23 e 37%, seguido pelo MP₁₀ (12-20%) e o SO₂ (2-20%). O estudo levou em conta dados de 597 cidades dispersas por todo o planeta e estimou que mais de 100.000 mortes prematuras foram evitadas nesse período devido à melhora da qualidade do ar (Liu; Wang; Zheng, 2020).

Nigam e colaboradores (2021) avaliaram os efeitos positivos das mudanças de comportamento durante a pandemia da Covid-19 na qualidade do ar em cidades da Índia, um dos países mais populosos do mundo. Nas 57 cidades estudadas foram observadas melhoras expressivas nos níveis de poluentes emitidos, comparando o ano de 2020 com o ano de 2019, pré-pandemia. Os autores concluíram que o efeito benéfico na qualidade do ar foi mais notável em cidades mais populosas. Na China, uma das nações com maior densidade populacional, os resultados foram parecidos com a Índia. No estudo feito por Silver e colaboradores (2020), foram notadas grandes mudanças nas concentrações de poluentes atmosféricos, os decréscimos foram observados principalmente nos poluentes MP, CO e NO₂. Essas reduções foram atribuídas ao tráfego urbano menos intenso e à menor combustão de carvão.

Já em território brasileiro, São Paulo, a cidade mais populosa do país, com mais de 11 milhões de habitantes, também apresentou melhora significativa na qualidade do ar durante o bloqueio, devido às condições favoráveis à dispersão de poluentes atmosféricos que ocorreram nesse intervalo, além da redução nas emissões de poluentes, principalmente o NO, NO₂ e CO (Nakada; Urban, 2020). No ano de 2020, em Belo Horizonte, uma breve análise foi feita pela FEAM, a pedido do jornal Estado de Minas. De acordo com Lovisi (2020), redator da matéria do jornal, ao analisar o mês de março do ano em questão, houve uma diminuição considerável na emissão de MP_{2,5} e NO₂, o que seria explicado pelo tráfego urbano de veículos reduzido.

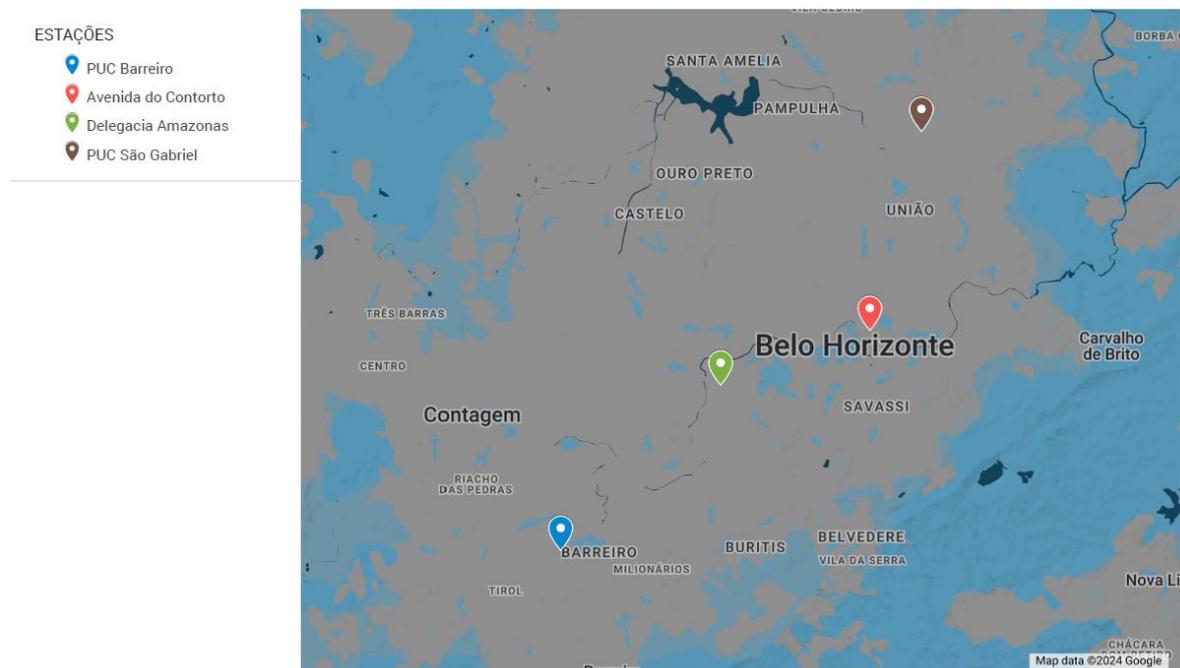
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo e obtenção de dados

O município de Belo Horizonte possui uma área aproximada de 331,35 quilômetros quadrados, com uma população de mais de 2,3 milhões de habitantes e densidade demográfica de 6.988,18 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2022).

Belo Horizonte conta com quatro estações ativas de monitoramento da qualidade do ar: a Estação Centro, localizada na Avenida do Contorno; a Estação Delegacia Amazonas, na Avenida Amazonas; a Estação PUC Barreiro, situada no bairro Barreiro; e, por fim, a Estação PUC São Gabriel, localizada no bairro São Gabriel (FEAM, 2023d). Essas estações foram alocadas estrategicamente em locais com intensa circulação e veículos e/ou atividade industrial na capital mineira (FEAM, 2023c), como pode ser observado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar em Belo Horizonte.



Fonte: (FEAM, 2023c).

Os dados de monitoramento contínuo da qualidade do ar foram obtidos através do site da FEAM e estão disponíveis publicamente (FEAM, 2023d).

Em relação à Estação Delegacia Amazonas, não há dados disponíveis para o ano de 2022, e os dados de 2021 foram considerados insuficientes. Por esse motivo, essa estação foi

desconsiderada no estudo. Diante disso, foram consideradas as informações das seguintes estações:

- 1- Estação Centro – Avenida do Contorno;
- 2- Estação PUC Barreiro;
- 3- Estação PUC São Gabriel.

Apesar da Covid-19 ter surgido no fim do ano de 2019, o estado de pandemia foi decretado apenas no início de 2020. De acordo com a disponibilidade de dados de cada estação, foram consideradas as medições a partir de janeiro de 2020 até dezembro de 2022.

As medições foram feitas com intervalos de uma hora, iniciando às 00:30 de cada dia e finalizando às 23:30. Foram monitoradas o MP_{10} , $MP_{2,5}$, NO_2 , O_3 , SO_2 e o CO (FEAM, 2023d).

Diferentes metodologias de amostragem dos poluentes são utilizadas pelas estações automáticas. O MP, independente do diâmetro, é monitorado através do monitor beta, o NO_2 por quimiluminescência, o CO por filtro de correlação em infravermelho, o O_3 por fotometria por ultravioleta e, por último, o SO_2 é monitorado através de fluorescência por ultravioleta (FEAM, 2011).

4.2 Tratamento dos dados e análise estatística

Os dados foram disponibilizados em planilha eletrônica, formato associado ao *software* Microsoft Excel®, utilizado no tratamento dos dados, fazendo a conversão das medições horárias em médias diárias, mensais e anuais.

Destaca-se que a medição dos poluentes foi feita de modo automático pelos equipamentos. Foram verificados períodos nos quais a medição não aconteceu por completo, ou seja, não houve o monitoramento de nenhum poluente, ou parcialmente, com uma fração dos poluentes sem monitoramento.

Primeiramente, para cada estação, os dados de todos os poluentes foram agrupados em médias diárias e mensais. Além disso, para os poluentes O_3 e CO foi necessário um tratamento extra, calculando a máxima média móvel de oito horas obtida no dia, ou seja, a maior média obtida, para cada período de 8 horas possível, dentro do intervalo de um dia, para que fosse possível comparar com os padrões de qualidade do ar da Resolução CONAMA nº 506/2024.

A média aritmética, utilizada nos cálculos anteriores, pode ser descrita conforme a Equação 4.1.

$$Média = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

Na qual:

a_i = valor assumido na i-gésima posição;

n = número de valores.

Para aprofundar a análise comparativa da evolução dos poluentes foram comparados os anos (2020, 2021 e 2022) em relação aos poluentes separadamente, para cada estação de monitoramento. Ao estudar a relação entre uma variável categórica, neste caso o ano, e uma variável numérica, neste caso um poluente (média diária), serão apresentadas as estatísticas descritivas da variável numérica das observações em cada categoria da variável. As estatísticas descritivas apresentadas são, além da média:

- Tamanho Amostral (N): quantidade de observações na amostra.
- Coeficiente de variação (CV): medida estatística que expressa a dispersão de um conjunto de dados em relação à sua média, em termos percentuais.
- Desvio Padrão (DP): medida da variação dos dados. Quanto maior o desvio padrão, maior é a variação das observações da amostra.
- Mínimo: menor valor observado na amostra.
- Mediana: valor tal que 50% das observações possuem um valor da variável abaixo dele.
- Máximo: maior valor observado na amostra.

Os dados de monitoramento dos poluentes foram introduzidos ao *software* estatístico R® (R CORE TEAM, 2023), no qual foram produzidos gráficos de dispersão e do tipo *boxplot*, para cada poluente de cada estação de monitoramento, além dos testes estatísticos.

A análise de gráficos de dispersão dos poluentes atmosféricos é essencial para compreender padrões de concentração, identificar tendências e comparar os valores com os limites legais, verificando a conformidade com os padrões de qualidade do ar.

Nos gráficos *boxplot*, formados por três segmentos de retas horizontais e dois verticais, tem-se os pontos que estão acima ou abaixo dos extremos são chamados de *outliers*, isto é, observações altas demais ou baixas demais para o padrão observado nos dados. O losango, que representa a média das observações e o segmento horizontal central no interior da caixa, que representa a mediana. Analisando a caixa de baixo para cima, existe o primeiro segmento horizontal (base da caixa) que representa o primeiro quartil e o último segmento que representa o terceiro quartil.

O Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk foi o primeiro a ser aplicado no conjunto de dados, a fim de determinar se a variável numérica tem distribuição normal a uma significância estatística de 5%. Se a variável tiver distribuição normal a uma significância estatística de 5% ($p > 0.05$) são realizados testes paramétricos, caso contrário seriam utilizados Testes Não-Paramétricos.

Não foram encontrados casos de distribuição normal, portanto somente foram necessários os testes não paramétricos de Kruskal-Wallis, de modo a determinar se existe relação entre as variáveis. A interpretação do p-valor do teste deve ser feita da seguinte forma: se o p-valor for menor que 0,05, significa que, a um nível de significância estatística de 5%, a distribuição da variável numérica não é a mesma em todas as categorias, logo há associação entre a variável categórica e a variável numérica consideradas. Caso o p-valor seja maior que 0,05, a um nível de significância estatística de 5%, não há associação entre as variáveis consideradas.

Caso o p-valor do Teste de Kruskal-Wallis seja menor que 0.05, de forma a haver diferença estatisticamente significativa entre a distribuição da variável numérica nas categorias da variável categórica, realizamos Testes de Wilcoxon com correção de Holm, de modo a comparar duas a duas as categorias da variável categórica a fim de determinar quais diferem em relação à distribuição da variável numérica. Ainda, havendo diferença estatisticamente significativa, analisam-se as estatísticas descritivas e o gráfico de *boxplot* de modo a determinar quais categorias tendem a ter valores maiores/menores.

A metodologia adotada incluiu a elaboração de tabelas diretamente no documento, com o objetivo de sintetizar as informações obtidas a partir dos gráficos e dos testes estatísticos realizados. Além disso, foi calculado o percentual de atendimento aos padrões de qualidade do

ar vigentes na época, representados pelo Padrão Intermediário I (PI-1) da Resolução CONAMA nº 506/2024, e também ao Padrão Final (PF) da mesma resolução. Essa análise visou avaliar se a qualidade do ar já alcança os critérios desejados para o futuro, proporcionando uma visão comparativa e prospectiva sobre o tema.

O percentual de atendimento aos padrões de qualidade do ar, foram calculados conforme a Equação 4.2.

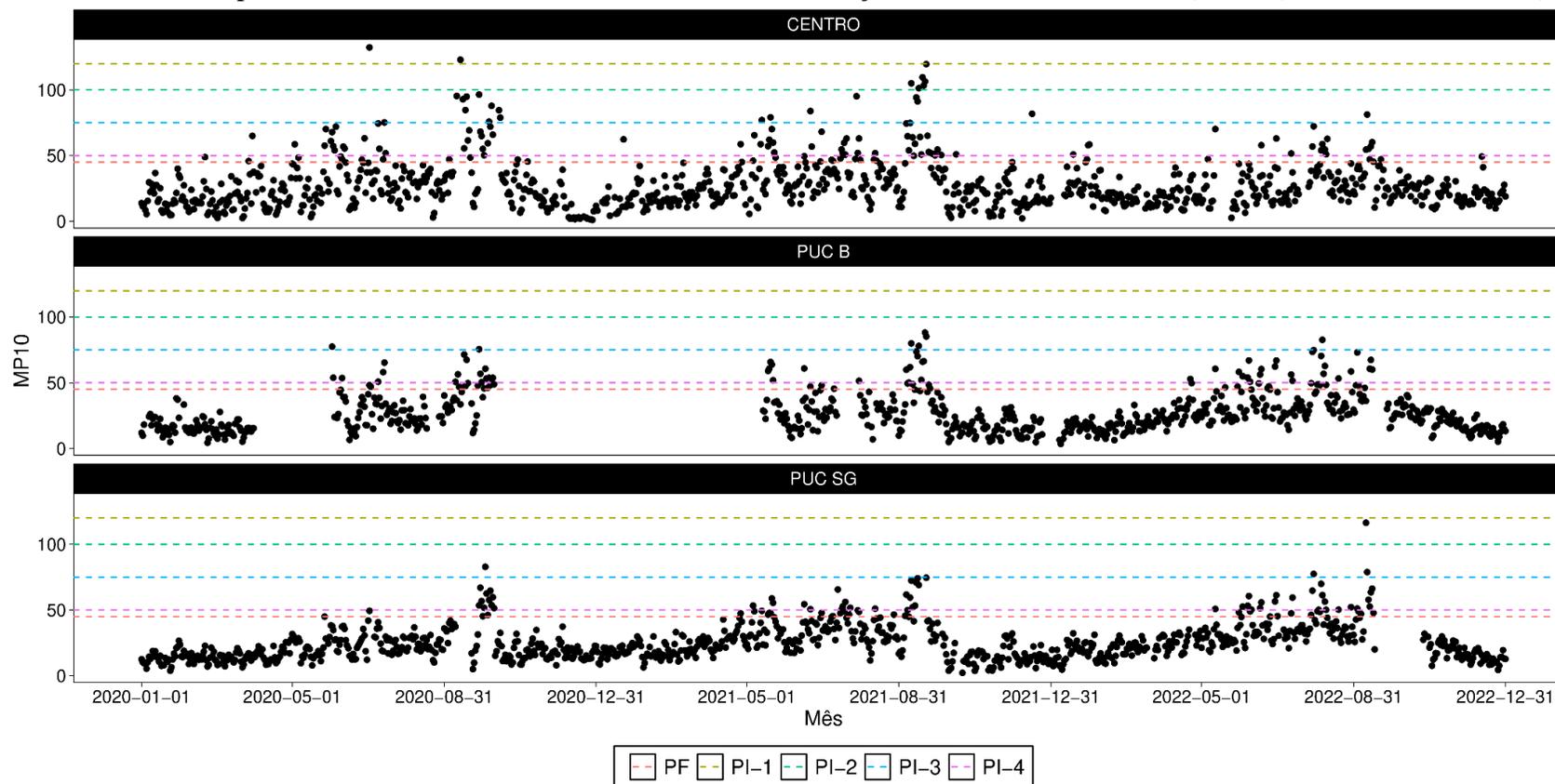
$$\textit{Percentual de atendimento} = \frac{\textit{N}^{\circ} \textit{ de observações abaixo do padrão}}{\textit{N}^{\circ} \textit{ de observações totais}} * 100 \quad \textit{Eq. (4.2)}$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dispersão das concentrações dos poluentes e padrões de qualidade do ar

As Figuras 5.3.1 a 5.3.6 mostram os gráficos de dispersão, para os poluentes monitorados, em cada estação de monitoramento. Cada ponto representa uma observação feita de acordo com os padrões legais da Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024, ou seja, para o MP₁₀, MP_{2,5} e SO₂ são médias diárias, para o NO₂ são valores máximos horários obtidos no dia e para o O₃ e CO são as máximas médias móveis em períodos de oito horas obtidas no dia. Em sequência, as Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, o percentual de conformidade dos dados de monitoramento da qualidade do ar com o PI-1 e o PF da resolução CONAMA nº 506/2024.

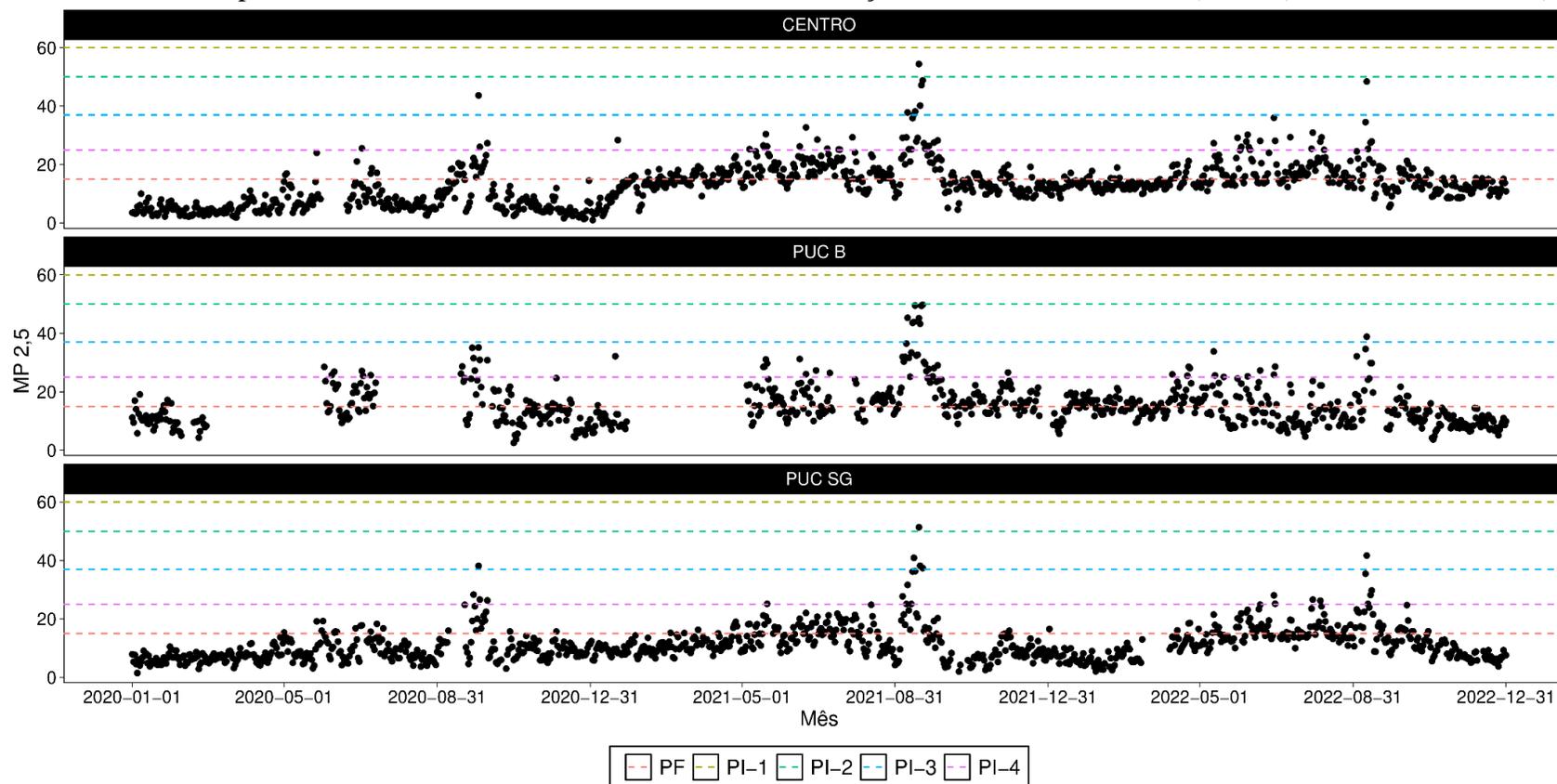
Figura 5.1 – Gráfico de dispersão com a média diária da variável MP₁₀ nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; PI representam os padrões intermediários e PF o padrão final da Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024.

Fonte: Autor (2024).

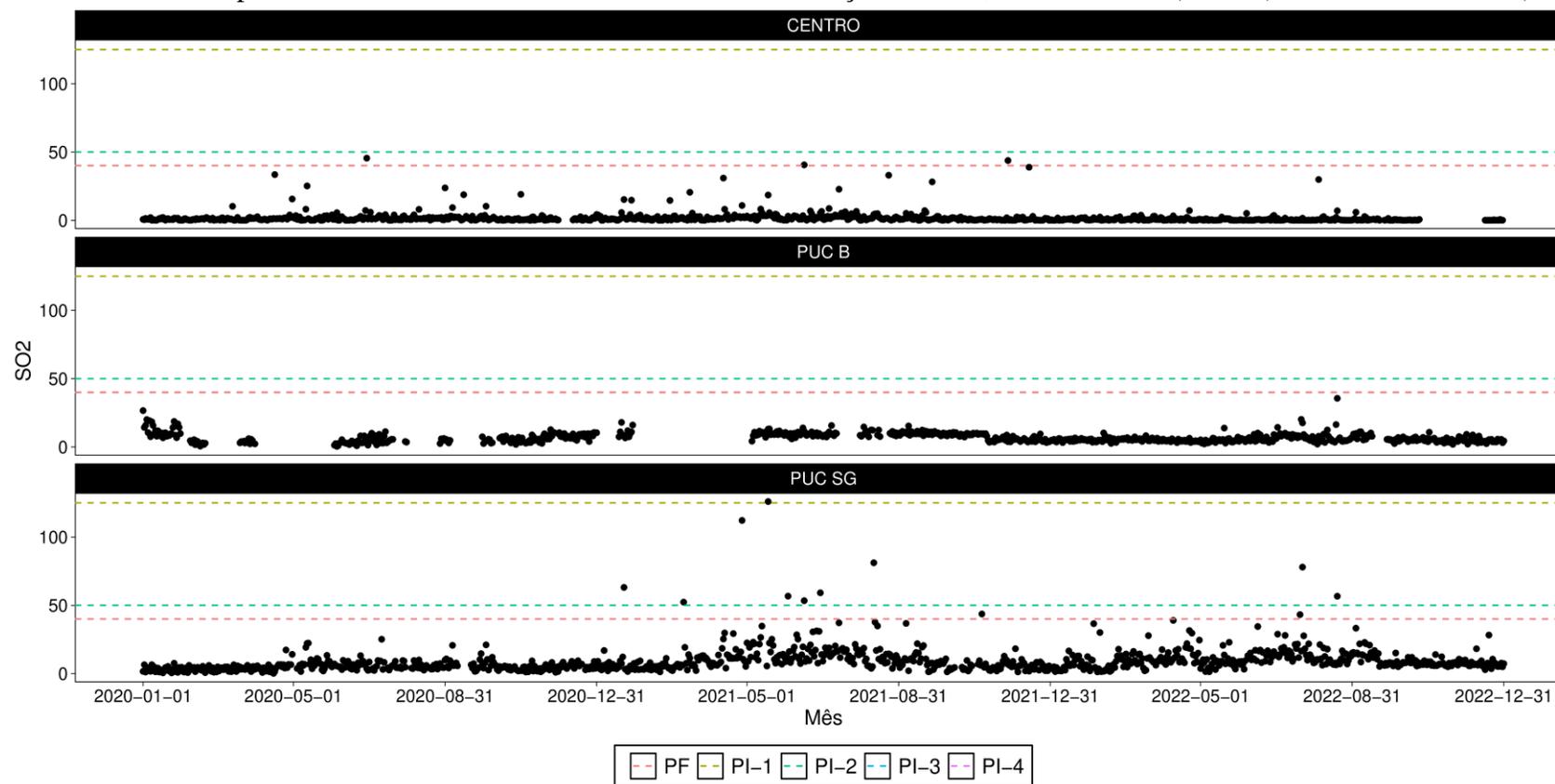
Figura 5.2 – Gráfico de dispersão com a média diária da variável $MP_{2,5}$ nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; PI representam os padrões intermediários e PF o padrão final da Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024.

Fonte: Autor (2024).

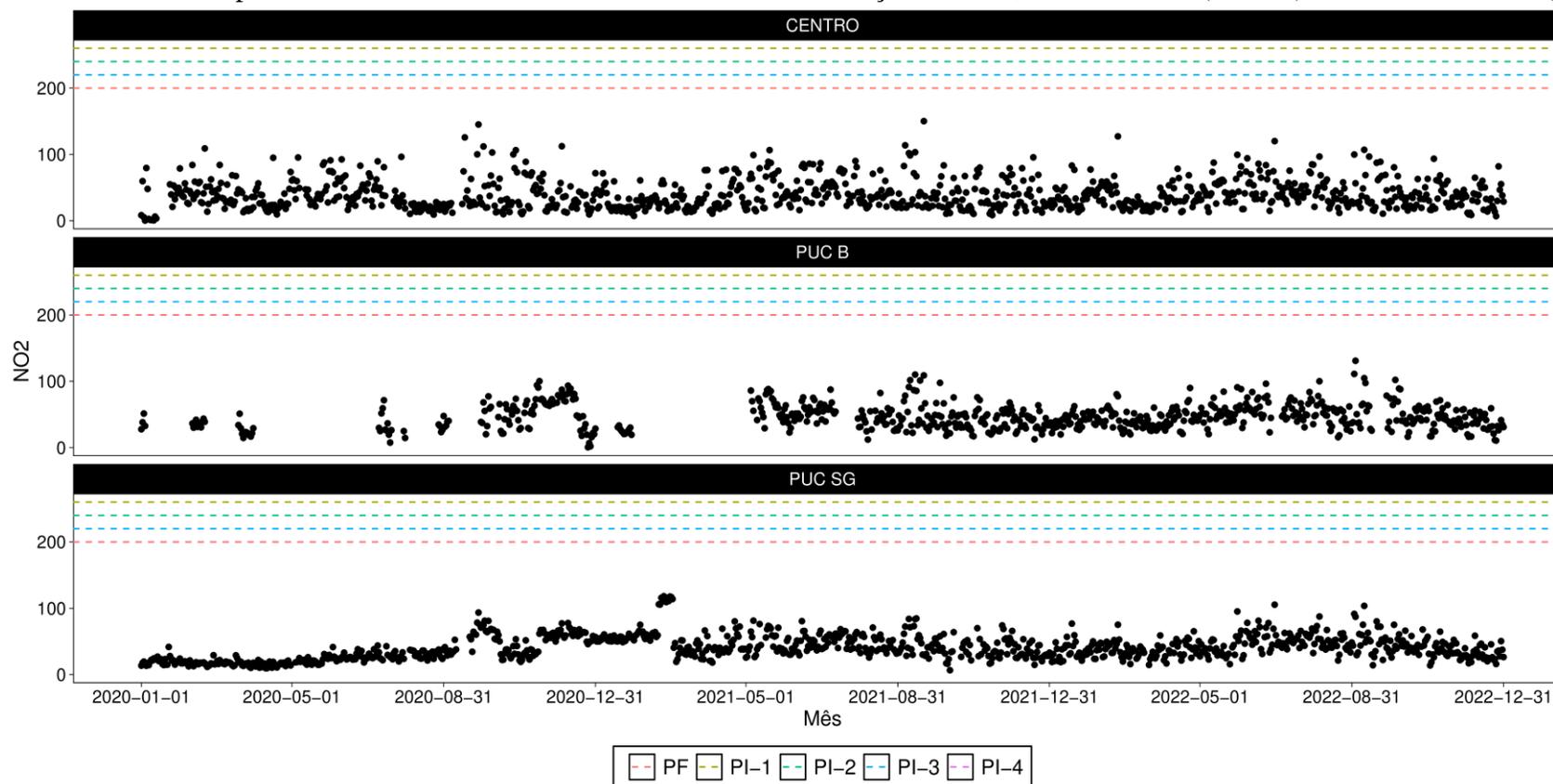
Figura 5.3 – Gráfico de dispersão com a média diária da variável SO₂ nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; PI representam os padrões intermediários e PF o padrão final da Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024.

Fonte: Autor (2024).

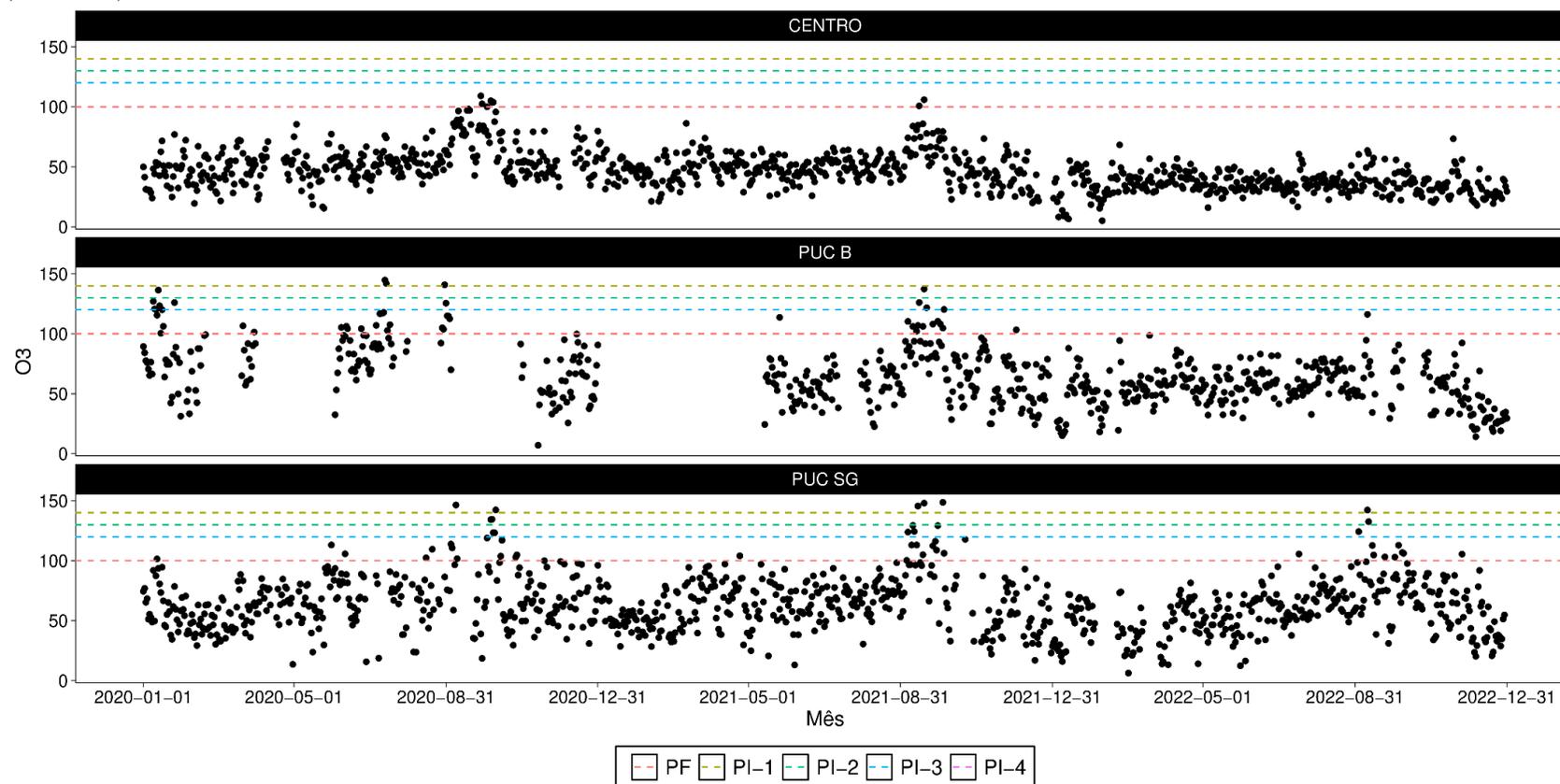
Figura 5.4 – Gráfico de dispersão com o máximo diário da variável NO₂ nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; PI representam os padrões intermediários e PF o padrão final da Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024.

Fonte: Autor (2024).

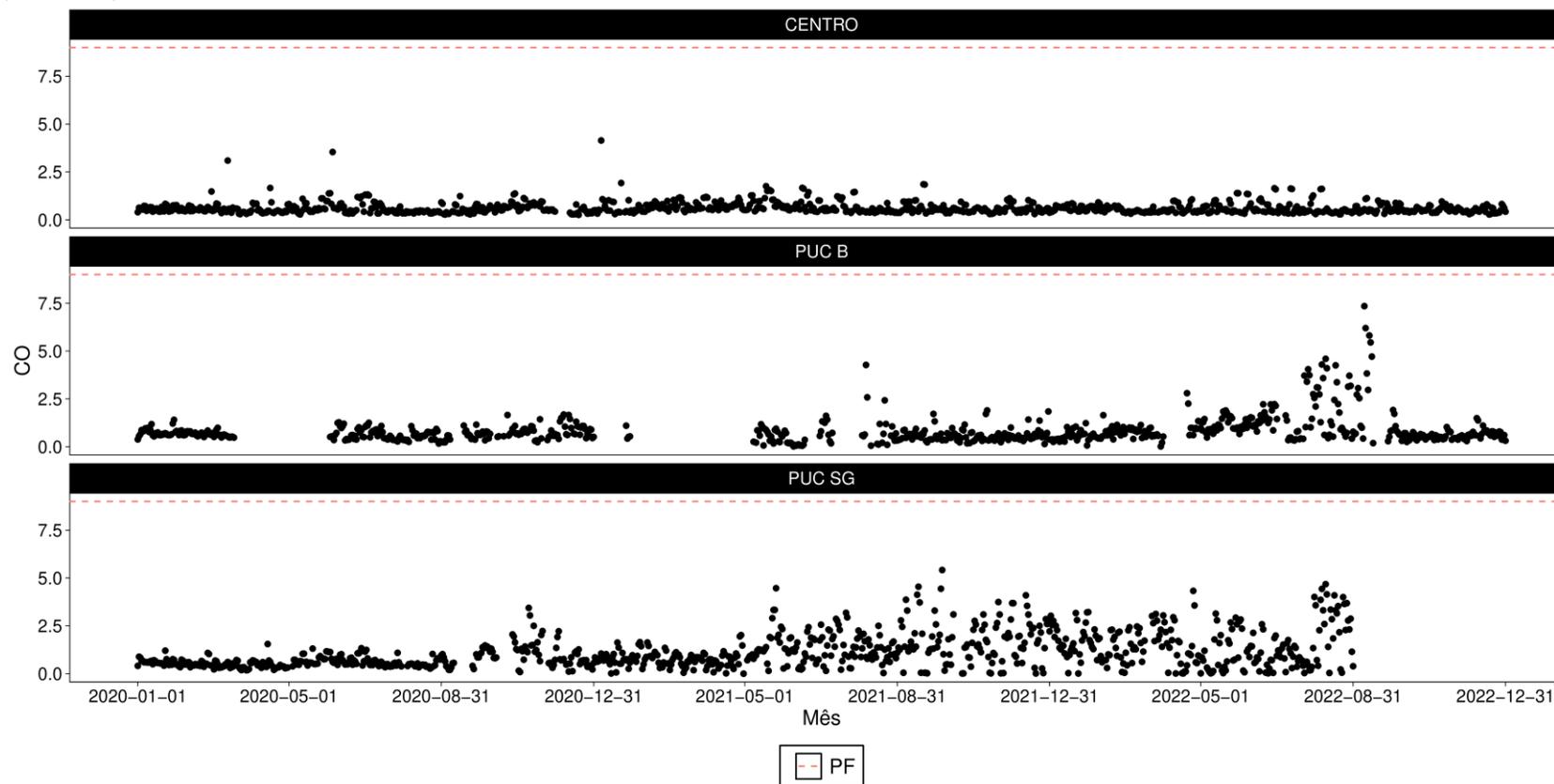
Figura 5.5 – Gráfico de dispersão com o máximo da média móvel de 8 horas da variável O₃ nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; PI representam os padrões intermediários e PF o padrão final da Resolução CONAMA n° 506, de 5 de julho de 2024.

Fonte: Autor (2024).

Figura 5.6 – Gráfico de dispersão com o máximo da média móvel de 8 horas da variável CO nas estações Centro, PUC Barreiro (PUC B) e PUC São Gabriel (PUC SG).



Legenda: Concentrações em ppm; PF representa o padrão final da Resolução CONAMA n° 506, de 5 de julho de 2024.

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5.1 – Tabela de porcentagem de atendimento ao Padrão intermediário I (PI-1) da Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024.

ESTAÇÕES	ANO	POLUENTE					
		MP ₁₀	MP _{2,5}	NO ₂	O ₃	SO ₂	CO
CENTRO	2020	99,4%	100%	100%	100%	100%	100%
	2021	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	2022	100%	100%	100%	100%	100%	100%
PUC BARREIRO	2020	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	2021	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	2022	100%	100%	100%	100%	100%	100%
PUC SÃO GABRIEL	2020	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	2021	100%	100%	100%	100%	99,7%	100%
	2022	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5.2 – Tabela de porcentagem de atendimento ao padrão final (PF) da Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024.

ESTAÇÕES	ANO	POLUENTE					
		MP ₁₀	MP _{2,5}	NO ₂	O ₃	SO ₂	CO
CENTRO	2020	89,4%	98,8%	100%	100%	98,9%	100%
	2021	86,5%	90,9%	100%	100%	97,8%	100%
	2022	94,2%	94,1%	100%	100%	99,7%	100%
PUC BARREIRO	2020	91,2%	92,6%	100%	100%	99,0%	100%
	2021	90,7%	85,4%	100%	100%	100%	100%
	2022	92,8%	95,4%	100%	100%	99,4%	100%
PUC SÃO GABRIEL	2020	96,8%	98,9%	100%	100%	98,5%	100%
	2021	94,3%	96,8%	100%	99,4%	89,7%	100%
	2022	91,7%	97,3%	100%	100%	92,5%	100%

Fonte: Autor (2024).

Vale ressaltar que os valores do PI-1 da Resolução CONAMA nº 506/2024 são equivalentes aos da Resolução CONAMA nº 491/2018, que era a legislação vigente entre os anos de 2020 e 2022, período correspondente ao estudo, levando isso em consideração, pode-se dizer que, de acordo com os dados apresentados na Tabela 5.1, em média, 99,98% das concentrações foram

respeitadas, considerando todos os poluentes, e o menor percentual de atendimento ao PI-1 foi das concentrações de MP_{10} no ano de 2020 (99,4%). Ao comparar os valores com o PF, que são valores estabelecidos pela OMS, a porcentagem de atendimento cai para 97,27% em média, segundo dados da Tabela 5.2, sendo que o menor percentual aconteceu em 2021, na Estação Barreiro, sobre as concentrações de $MP_{2,5}$ (85,4%). Portanto, os dados analisados a partir das medições realizadas pelas estações automáticas de monitoramento de poluentes atmosféricos em Belo Horizonte indicam que, no geral, os padrões de qualidade do ar são respeitados.

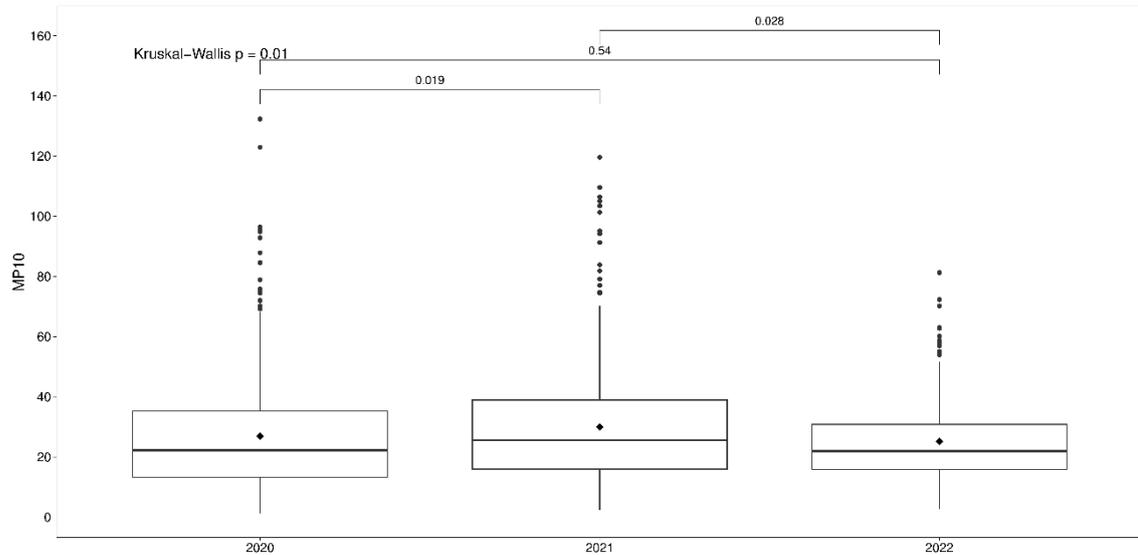
Analisando cada estação de monitoramento, a partir das Figuras 5.1 a 5.6, a Estação PUC Barreiro destacou-se positivamente, com todas as medições atendendo ao PI-1 durante todo o período de análise. Ao observar os poluentes, tanto o NO_2 quanto o CO mantiveram-se dentro do padrão final, em todas as três estações monitoradas e durante todos os anos (2020 a 2022).

Como a maior parte das concentrações dos poluentes estão dentro dos limites estabelecidos pelo padrão estabelecido pela Resolução CONAMA nº 506/2024, pode-se concluir que, no geral, a cidade de Belo Horizonte apresentou uma boa qualidade do ar.

5.2 Comparação das concentrações dos poluentes

São apresentados gráficos do tipo *boxplot*, representados pelas figuras 5.7 a 5.12, que permitem uma avaliação visual de estatísticas referentes as concentrações dos poluentes monitorados na Estação Centro, bem como os resultados dos testes de Kruskal-Wallis e de Wilcoxon com correlação de Holm. Em sequência a Tabela 5.3 agrupa as medianas dos poluentes com os resultados dos testes de Wilcoxon com correlação de Holm para cada grupo de combinação entre os anos. Por fim, a Tabela 5.4 apresenta a estatística descritiva para todos os poluentes, entre o período de 2020 a 2022, também em relação a Estação Centro.

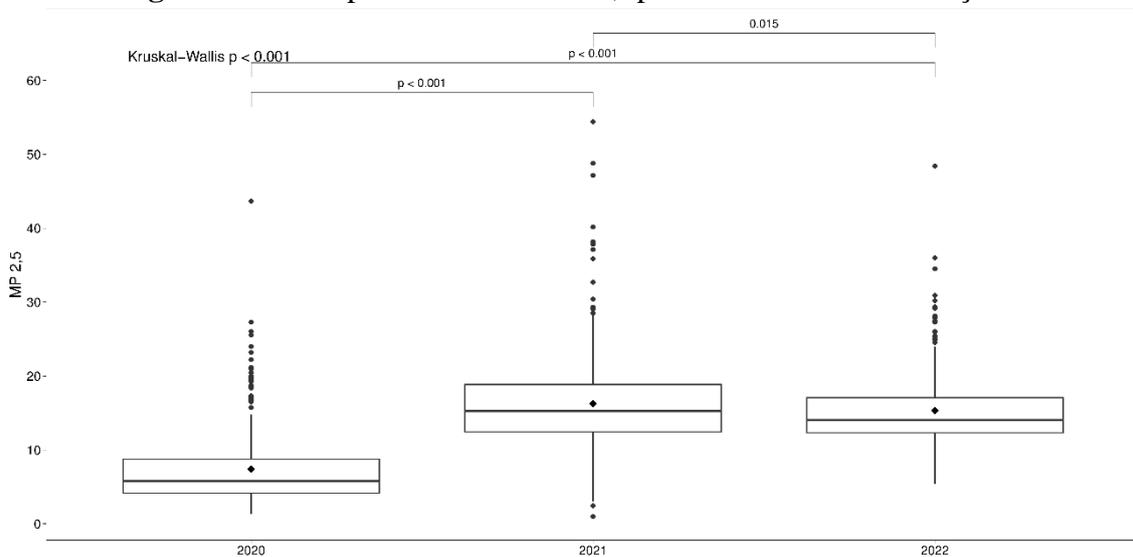
Figura 5.7 – Boxplot da variável MP_{10} pela variável ano da Estação Centro.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

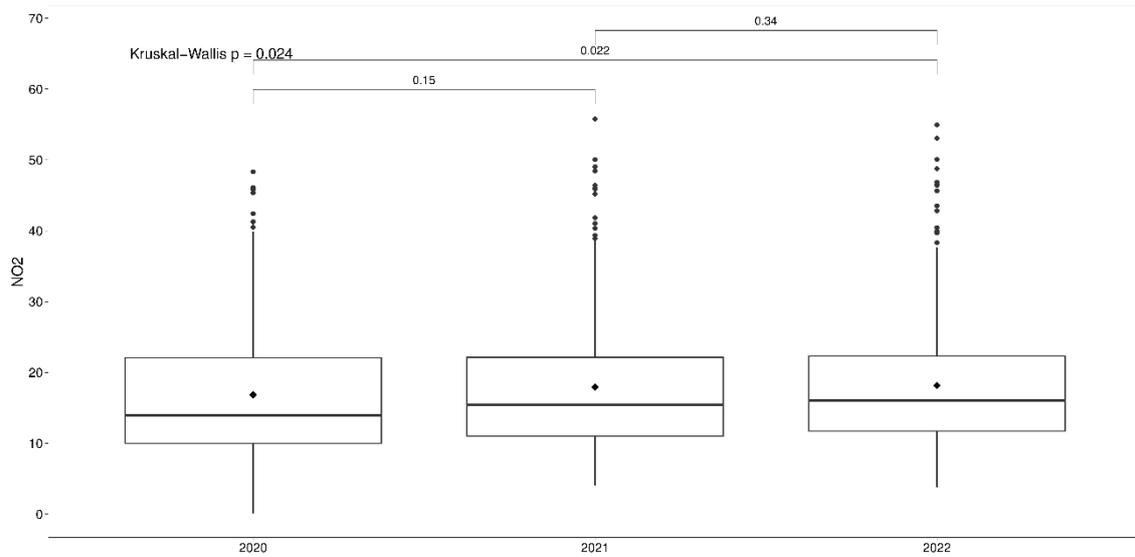
Figura 5.8 – Boxplot da variável $MP_{2,5}$ pela variável ano da Estação Centro.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

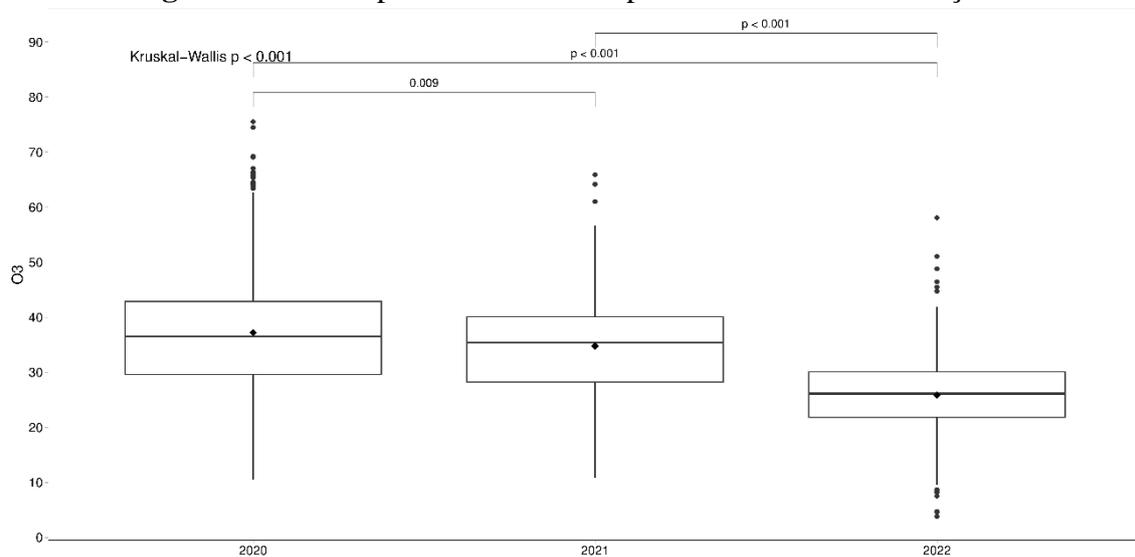
Figura 5.9 – Boxplot da variável NO₂ pela variável ano da Estação Centro.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

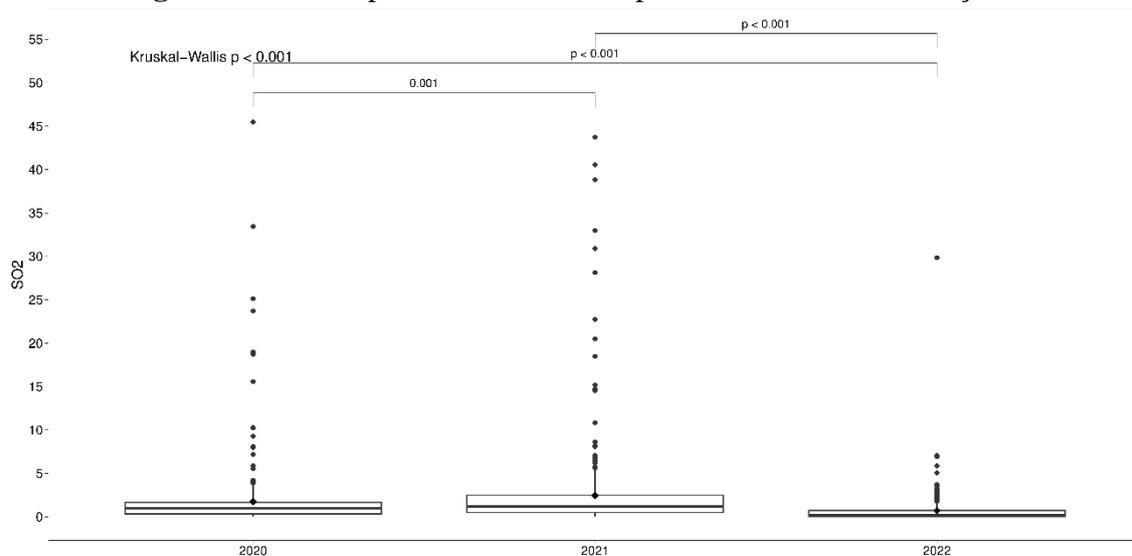
Figura 5.10 – Boxplot da variável O₃ pela variável ano da Estação Centro.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

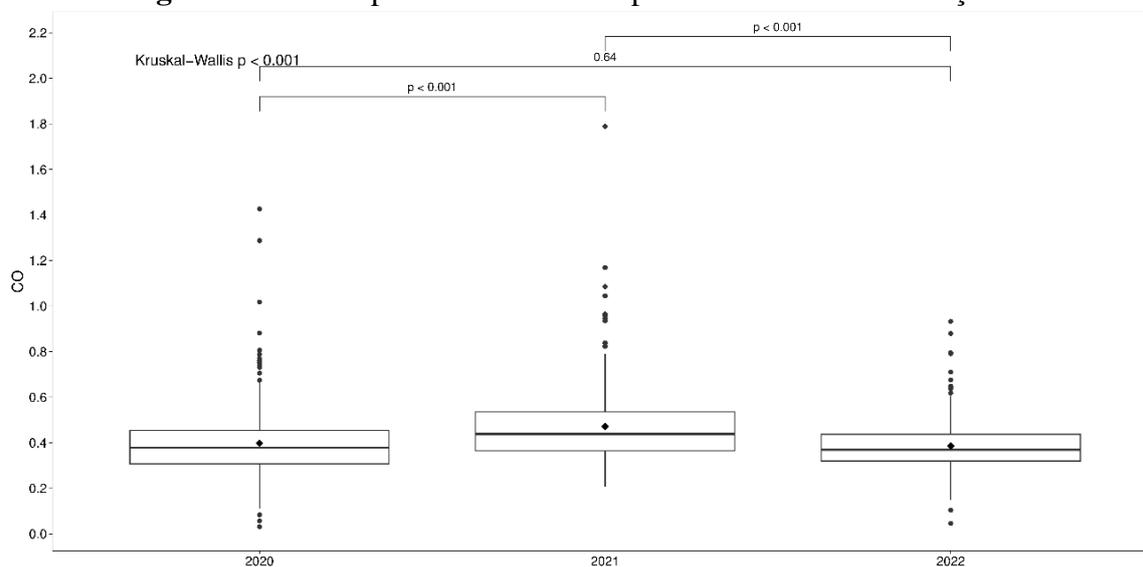
Figura 5.11 – Boxplot da variável SO₂ pela variável ano da Estação Centro.



Legenda: Concentrações em µg/m³; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

Figura 5.12 – Boxplot da variável CO pela variável ano da Estação Centro.



Legenda: Concentrações em ppm; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5.3 – Valores de mediana dos poluentes monitorados na Estação Centro, separados por ano e resultados (p-valor) dos testes de Wilcoxon com correção de Holm para cada combinação de anos possíveis.

Variável	Mediana			P-Valor		
	2020	2021	2022	2020/2021	2020/2022	2021/2022
MP ₁₀ (µg/m ³)	22,3	25,5	21,9	0,019*	0,54	0,028*
MP _{2,5} (µg/m ³)	5,78	15,3	14,0	<0,001*	<0,001*	0,015*
NO ₂ (µg/m ³)	14,0	15,5	16,0	0,15	0,022*	0,34
O ₃ (µg/m ³)	36,5	35,4	26,1	0,009*	<0,001*	<0,001*
SO ₂ (µg/m ³)	0,96	1,19	0,22	0,001*	p<0,001*	<0,001*
CO (ppm)	0,38	0,44	0,37	<0,001*	0,64	<0,001*

Legenda: *Diferença significativa estatisticamente entre os valores das medianas nos anos indicados (p<0,05; Teste Wilcoxon com correção de Holm).

Fonte: Autor (2025).

Tabela 5.4 – Estatística descritiva das concentrações dos poluentes atmosféricos monitorados na Estação Centro.

Variável	Ano	Número de Observações	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Mínimo	Máximo	Mediana
MP ₁₀ (µg/m ³)	2020	348	26,9	20,3	0,75	1,10	132,3	22,3
	2021	356	30,0	19,8	0,66	2,25	119,6	25,5
	2022	327	25,2	12,7	0,50	2,60	81,3	21,9
MP _{2,5} (µg/m ³)	2020	338	7,42	5,16	0,70	1,33	43,7	5,78
	2021	362	16,3	6,68	0,41	1	54,4	15,3
	2022	358	15,3	4,95	0,32	5,42	48,4	14,0
NO ₂ (µg/m ³)	2020	333	16,9	9,78	0,58	0,06	48,3	14,0
	2021	363	17,9	9,49	0,53	4,07	55,8	15,5
	2022	365	18,2	8,99	0,50	3,79	54,9	16,0
O ₃ (µg/m ³)	2020	343	37,2	11,9	0,32	10,5	75,5	36,5
	2021	353	34,8	9,51	0,27	10,8	65,9	35,4
	2022	365	25,8	7,27	0,28	3,79	58,1	26,1
SO ₂ (µg/m ³)	2020	351	1,73	3,96	2,29	0	45,5	0,96
	2021	362	2,45	5,13	2,09	0	43,7	1,19
	2022	303	0,70	1,94	2,79	0	29,8	0,22
CO (ppm)	2020	350	0,40	0,15	0,38	0,03	1,43	0,38
	2021	362	0,47	0,17	0,35	0,21	1,79	0,44
	2022	360	0,39	0,11	0,28	0,05	0,93	0,37

Fonte: Autor (2025).

A partir da análise dos gráficos e tabelas acima observa-se, em primeiro momento, que todos os poluentes apresentaram diferenças estatisticamente significativas, pelo menos entre um grupo de dados, de acordo com os testes de Kruskal-Wallis.

Avaliando cada poluente separadamente, o MP₁₀ teve suas menores concentrações medianas nos anos de 2020 (22,3 µg/m³) e 2022 (21,9 µg/m³), uma vez que o teste Wilcoxon com correção de Holm não acusou diferença significativa entre os dois anos citados (p=0,54), a um nível de significância de 5%. Ambos os anos apresentaram diferença significativa com o ano de 2021, que teve a maior mediana (25,5 µg/m³).

O MP_{2,5}, segundo o teste de Wilcoxon com correção de Holm, indicou diferença significativa entre todos os anos. Portanto, pode-se dizer que a menor mediana ocorreu em 2022 (5,78 µg/m³).

Ao analisar o NO₂, o teste Wilcoxon acusou diferença estatisticamente significativa somente entre os anos 2020 e 2022 (p=0,022), a um nível de significância de 5%. Entretanto, como o teste não mostrou diferença significativa entre os demais anos, 2020/2021 e 2021/2022, não é possível concluir que algum dos anos apresentou medianas maiores ou menores.

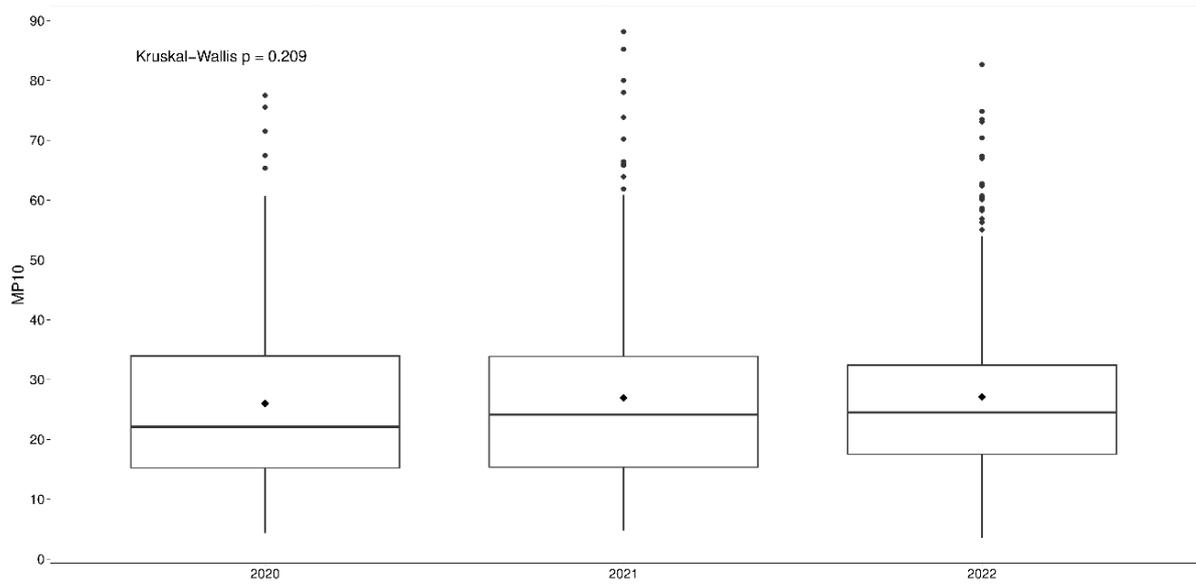
Tal como o MP_{2,5}, o O₃ apresentou diferença significativa entre todos os anos, segundo o teste de Wilcoxon. Deste modo, o menor valor de mediana encontrado foi o referente ao ano de 2022 (26,1 µg/m³).

Igualmente, o SO₂ teve diferença significativa entre todos os anos. O menor valor da mediana ocorreu em 2022 (0,22 µg/m³) e o maior em 2021 (1,19 µg/m³).

Em última análise, o CO apresentou diferença estatisticamente significativa entre os anos 2020/2021 (p<0,001) e 2021/2022 (p<0,001), mas não entre 2020 e 2022 (p=0,64). Isso significa as menores medianas são as de 2020 (0,38 ppm) e de 2022 (0,39 ppm), sem diferença estatística entre elas.

As Figuras 5.13 a 5.18, a seguir, mostram os *boxplots* dos poluentes na Estação PUC Barreiro. As Tabelas 5.5 e 5.6 trazem, respectivamente, as medianas dos poluentes junto ao p-valor do teste de Wilcoxon com correção de Holm e a estatística descritiva das concentrações dos poluentes monitorados na mesma estação de monitoramento de qualidade do ar.

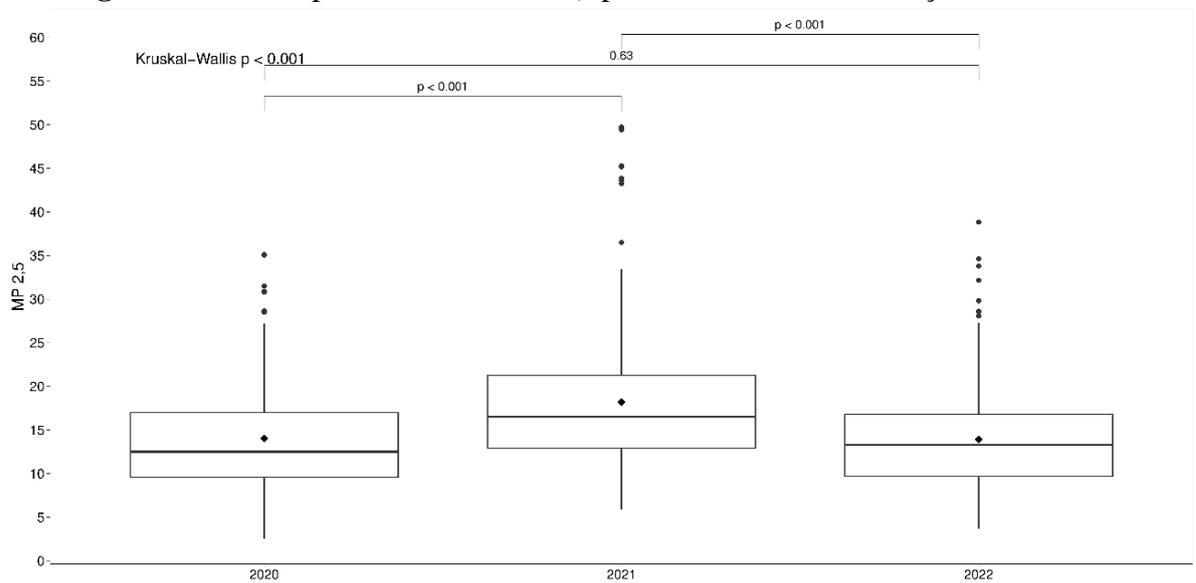
Figura 5.13 – Boxplot da variável MP_{10} pela variável ano da Estação PUC Barreiro.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

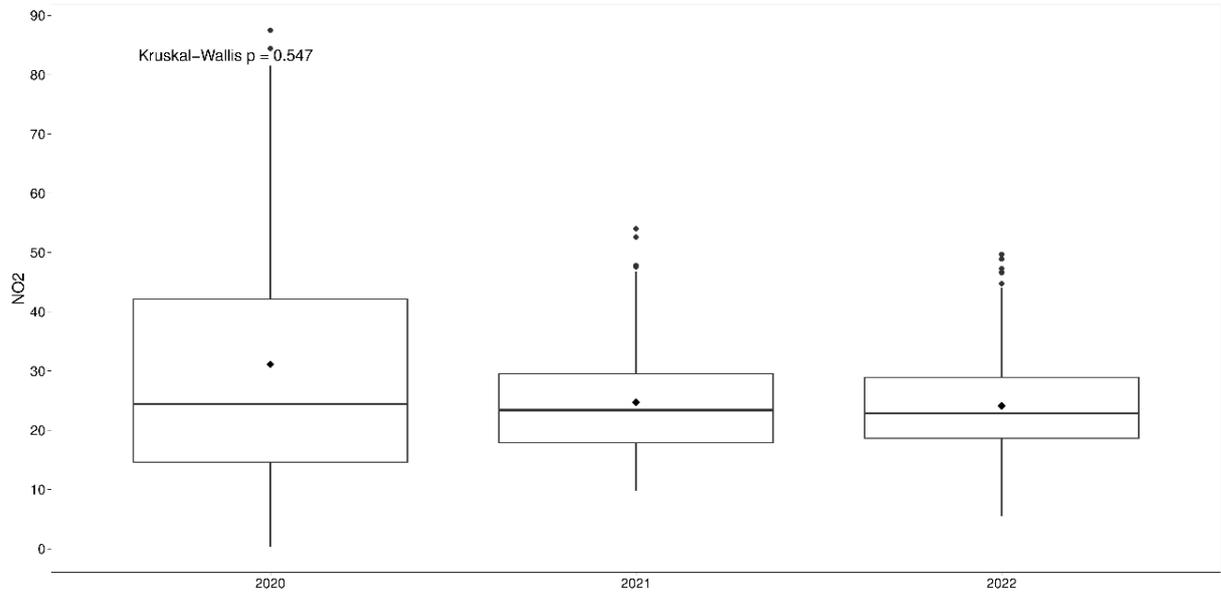
Figura 5.14 – Boxplot da variável $MP_{2,5}$ pela variável ano da Estação PUC Barreiro.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

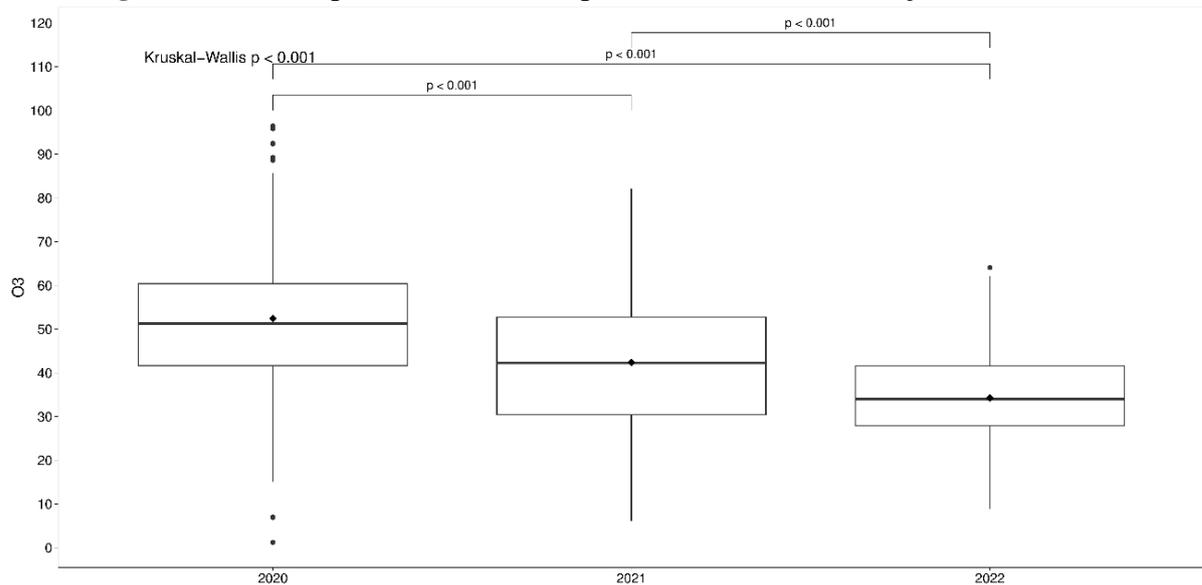
Figura 5.15 – Boxplot da variável NO₂ pela variável ano da Estação PUC Barreiro.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

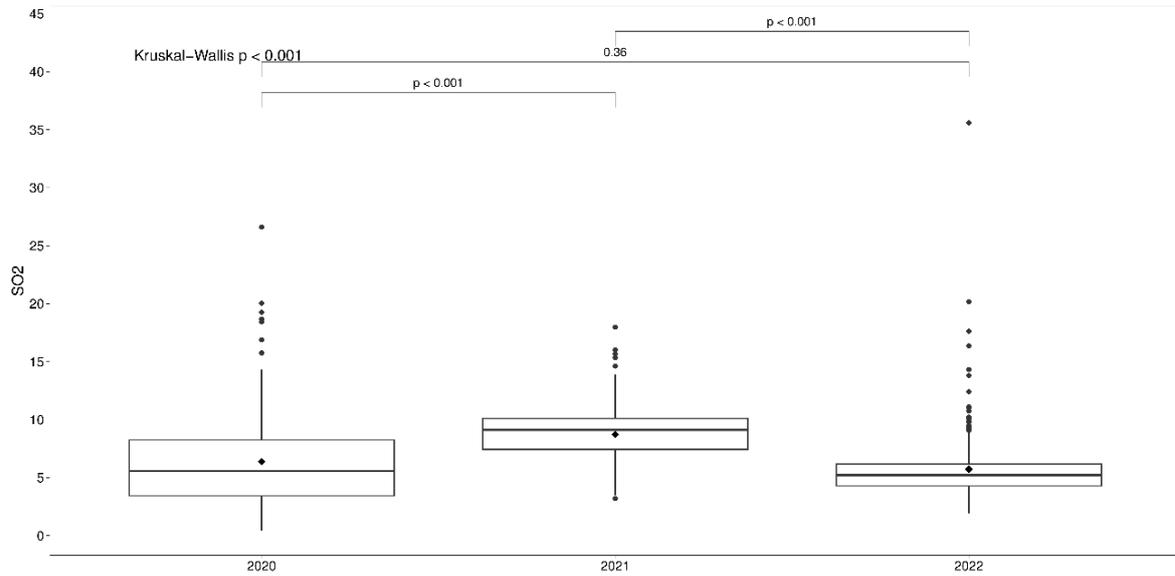
Figura 5.16 – Boxplot da variável O₃ pela variável ano da Estação PUC Barreiro.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

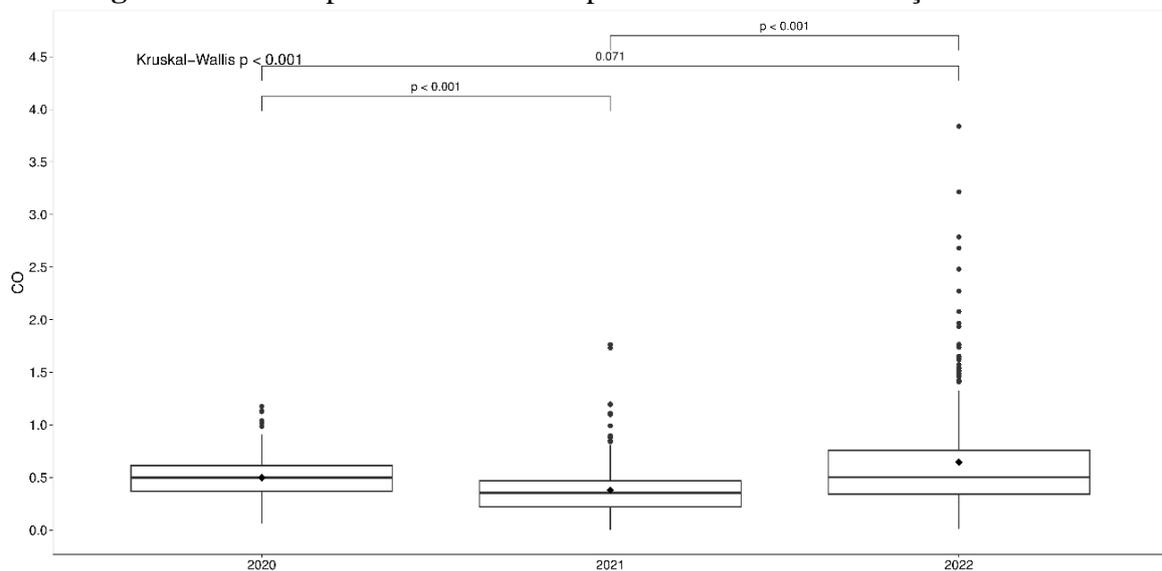
Figura 5.17 – *Boxplot* da variável SO₂ pela variável ano da Estação PUC Barreiro.



Legenda: Concentrações em µg/m³; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

Figura 5.18 – *Boxplot* da variável CO pela variável ano da Estação PUC Barreiro.



Legenda: Concentrações em ppm; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5.5 – Valores de mediana dos poluentes monitorados na Estação PUC Barreiro, separados por ano e resultados (p-valor) dos testes de Kruskal-Wallis ou Wilcoxon com correção de Holm para cada combinação de anos possíveis.

Variável	Mediana			P-Valor		
	2020	2021	2022	2020/2021	2020/2022	2021/2022
MP ₁₀ (µg/m ³)	22,1	24,2	24,5	0,209		
MP _{2,5} (µg/m ³)	12,5	16,5	13,3	<0,001*	0,63	<0,001*
NO ₂ (µg/m ³)	24,4	23,4	22,9	0,547		
O ₃ (µg/m ³)	51,2	42,3	34,0	<0,001*	<0,001*	<0,001*
SO ₂ (µg/m ³)	5,58	9,13	5,21	<0,001*	0,36	<0,001*
CO (ppm)	0,50	0,35	0,50	<0,001*	0,071	<0,001*

Legenda: *Diferença significativa estatisticamente entre os valores das medianas nos anos indicados ($p < 0,05$; Teste Wilcoxon com correção de Holm); Células em amarelo indicam que não houve diferença significativa estatisticamente em todo o conjunto de dados ($p > 0,05$; Teste Kruskal-Wallis).

Fonte: Autor (2025).

Tabela 5.6 – Estatística descritiva das concentrações dos poluentes atmosféricos monitorados na Estação PUC Barreiro.

Variável	Ano	Número de Observações	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Mínimo	Máximo	Mediana
MP ₁₀ (µg/m ³)	2020	205	26,0	14,9	0,57	4,38	77,5	22,1
	2021	204	27,0	16,5	0,61	4,83	88,2	24,2
	2022	345	27,1	13,8	0,51	3,50	82,7	24,5
MP _{2,5} (µg/m ³)	2020	190	14,1	6,44	0,46	2,50	35,1	12,5
	2021	240	18,2	7,95	0,44	5,92	49,8	16,5
	2022	350	13,9	5,50	0,39	3,67	38,8	13,3
NO ₂ (µg/m ³)	2020	133	31,1	21,3	0,68	0,30	87,5	24,4
	2021	231	24,7	8,81	0,36	9,78	54,0	23,4
	2022	346	24,1	8,13	0,34	5,48	49,7	22,9
O ₃ (µg/m ³)	2020	167	52,4	17,0	0,32	1,22	96,4	51,2
	2021	207	42,4	14,8	0,35	6,06	82,0	42,3
	2022	318	34,3	10,6	0,31	8,79	64,1	34,0
SO ₂ (µg/m ³)	2020	198	6,38	3,93	0,62	0,42	26,6	5,58
	2021	224	8,72	2,52	0,29	3,20	18,0	9,13
	2022	354	5,72	2,70	0,47	1,91	35,6	5,21
CO (ppm)	2020	265	0,50	0,19	0,39	0,06	1,18	0,50
	2021	202	0,38	0,26	0,70	0,00	1,76	0,35
	2022	329	0,65	0,50	0,78	0,01	3,84	0,50

Fonte: Autor (2025).

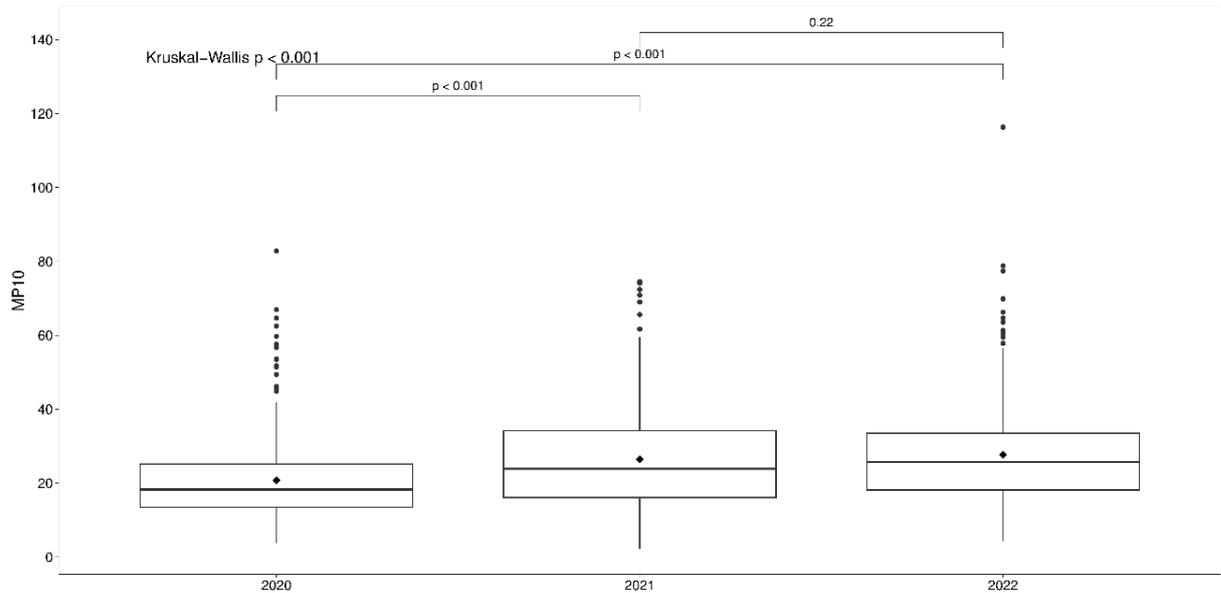
As Figuras 5.13 a 5.18 e as Tabelas 5.5 e 5.6 permitem a análise das concentrações dos poluentes atmosféricos monitorados na Estação PUC Barreiro. A partir desses elementos, nota-se que tanto para o MP_{10} , quanto para o NO_2 , não houve diferença estatisticamente significativa entre as concentrações, segundo o teste Kruskal-Wallis, considerando um nível de significância de 5% ($p=0,209$ e $p=0,547$, respectivamente), portanto não há conclusão sobre qual ano apresentou maiores e menores concentrações dos poluentes citados, neste local.

As concentrações dos demais poluentes apresentaram diferenças significativas. Iniciando pelo $MP_{2,5}$, essas diferenças ocorreram entre 2020/2021 ($p<0,001$) e 2021/2022 ($p<0,001$), mas não aconteceu nos anos 2020/2022 ($p=0,63$). Deste modo, evidencia-se que os anos de 2020 e 2022 apresentaram as menores concentrações medianas do poluente, com valores de $12,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $13,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, e a maior ocorreu em 2021 ($16,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

De acordo com os resultados do teste de Wilcoxon com correção de Holm, as concentrações de O_3 contam com diferença significativa entre todas as combinações de anos. O ano de 2022 foi o com menor mediana ($34,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e 2020 ficou com a maior mediana ($51,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Os dois poluentes restantes, SO_2 e CO , tiveram resultados semelhantes a partir do teste de Wilcoxon. Estes exibem diferenças significativas entre os anos 2020/2021 ($p<0,001$ para ambos poluentes) e 2021/2022 ($p<0,001$ para ambos poluentes), mas não entre 2020/2022 ($p[SO_2] = 0,36$; $p[CO]=0,071$). Os anos de 2020 e 2022 foram aqueles com menores medianas. Para o CO os valores dessas medianas coincidiram em $0,50 \text{ ppm}$ nos dois anos, já avaliando o SO_2 , os valores foram de $5,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 2020 e $5,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 2022.

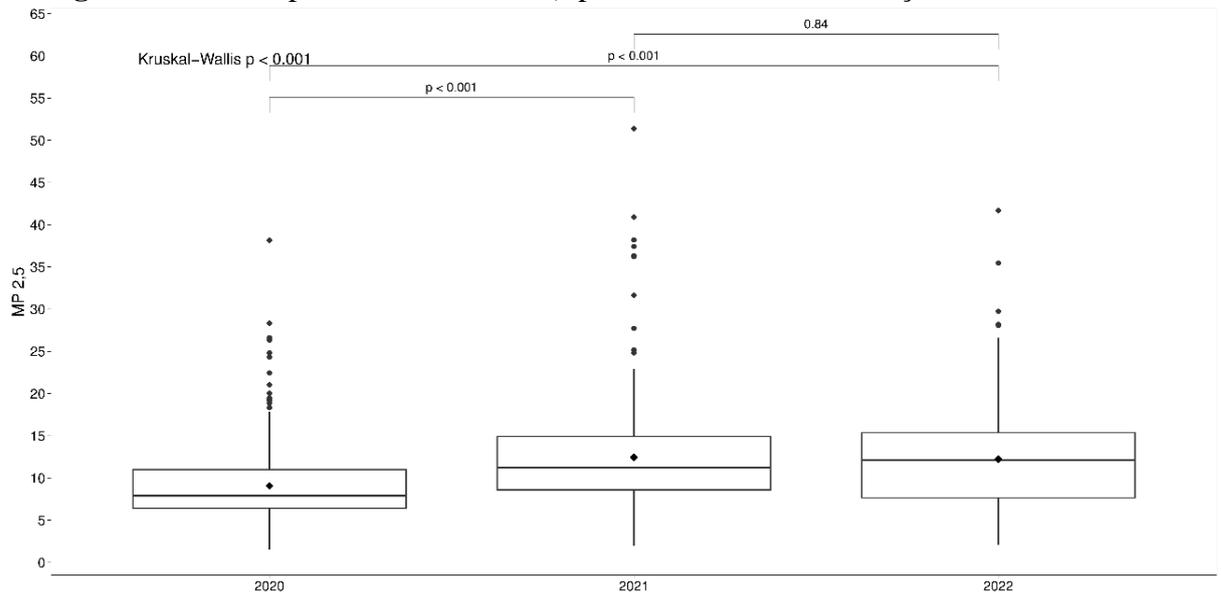
Figura 5.19 – Boxplot da variável MP_{10} pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

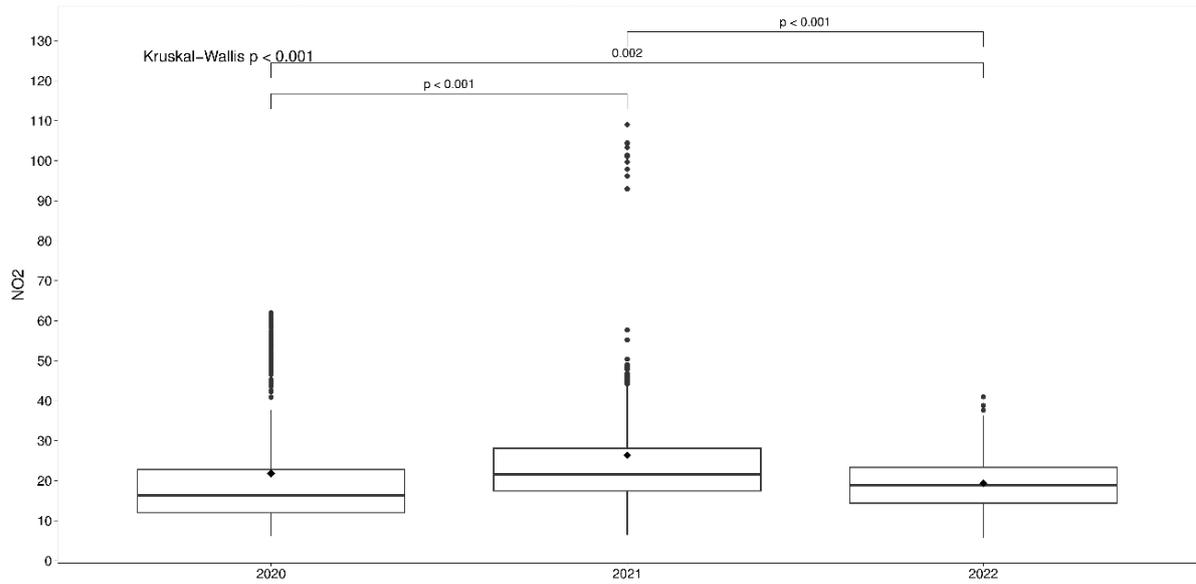
Figura 5.20 – Boxplot da variável $MP_{2,5}$ pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.



Legenda: Concentrações em $\mu\text{g}/\text{m}^3$; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

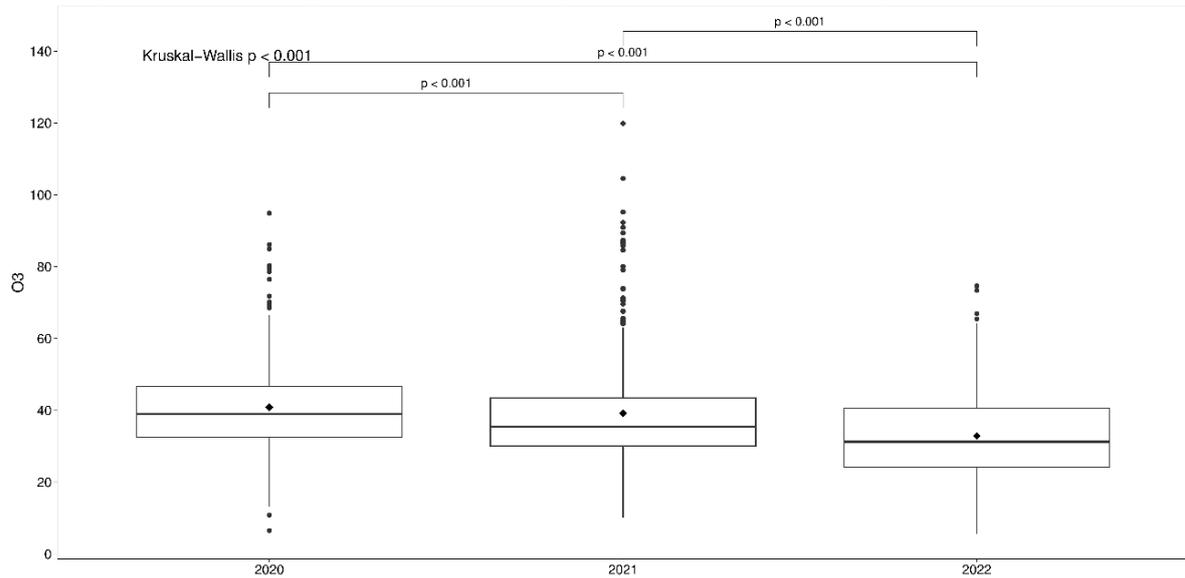
Figura 5.21 – Boxplot da variável NO₂ pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.



Legenda: Concentrações em µg/m³; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

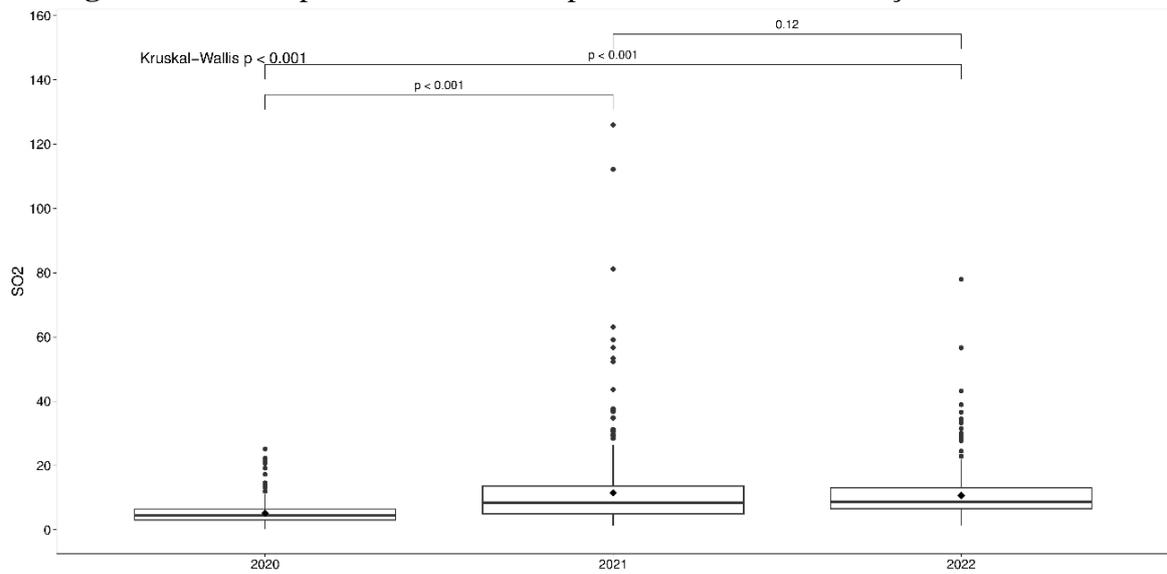
Figura 5.22 – Boxplot da variável O₃ pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.



Legenda: Concentrações em µg/m³; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

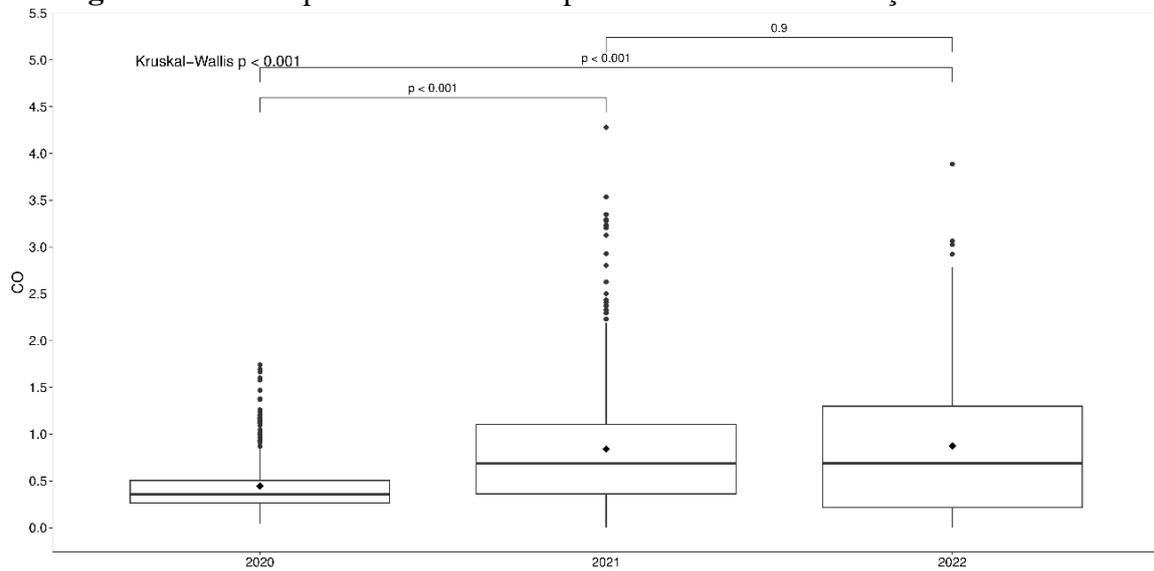
Figura 5.23 – Boxplot da variável SO₂ pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.



Legenda: Concentrações em µg/m³; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

Figura 5.24 – Boxplot da variável CO pela variável ano da Estação PUC São Gabriel.



Legenda: Concentrações em ppm; P-valor do Teste de Wilcoxon com correção de Holm indicado acima da barra que liga cada par de grupos.

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5.7 – Valores de mediana dos poluentes monitorados na Estação PUC São Gabriel, separados por ano e resultados (p-valor) dos testes de Wilcoxon com correção de Holm para cada combinação de anos possíveis.

Variável	Mediana			P-Valor		
	2020	2021	2022	2020/2021	2020/2022	2021/2022
MP ₁₀ (µg/m ³)	18,3	23,9	25,7	<0,001*	<0,001*	0,22
MP _{2,5} (µg/m ³)	7,91	11,3	12,1	<0,001*	<0,001*	0,84
NO ₂ (µg/m ³)	16,4	21,6	18,9	<0,001*	0,002*	<0,001*
O ₃ (µg/m ³)	39,0	35,4	31,3	<0,001*	<0,001*	<0,001*
SO ₂ (µg/m ³)	4,46	8,44	8,74	<0,001*	<0,001*	0,12
CO (ppm)	0,36	0,69	0,69	<0,001*	<0,001*	0,9

Legenda: *Diferença significativa estatisticamente entre os valores das medianas nos anos indicados (p<0,05; Teste Wilcoxon com correção de Holm).

Fonte: Autor (2025).

Tabela 5.8 – Estatística descritiva das concentrações dos poluentes atmosféricos monitorados na Estação PUC São Gabriel.

Variável	Ano	Número de Observações	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Mínimo	Máximo	Mediana
MP ₁₀ (µg/m ³)	2020	349	20,7	11,0	0,53	3,75	82,8	18,3
	2021	348	26,4	13,7	0,52	2,17	74,5	23,9
	2022	313	27,7	14,2	0,51	4,36	116,3	25,7
MP _{2,5} (µg/m ³)	2020	348	9,08	4,37	0,48	1,50	38,2	7,91
	2021	345	12,5	6,05	0,49	2,00	52,4	11,3
	2022	333	12,2	5,73	0,47	2,07	41,7	12,1
NO ₂ (µg/m ³)	2020	344	21,8	14,7	0,68	6,15	62,0	16,4
	2021	351	26,4	16,9	0,64	6,49	109,0	21,6
	2022	358	19,4	6,4	0,33	5,64	41,0	18,9
O ₃ (µg/m ³)	2020	323	40,9	12,7	0,31	6,49	94,9	39,0
	2021	337	39,2	15,4	0,39	10,1	119,9	35,4
	2022	328	32,9	12,4	0,38	5,50	74,6	31,3
SO ₂ (µg/m ³)	2020	344	5,17	3,43	0,66	0,14	25,2	4,46
	2021	351	11,5	12,7	1,10	1,24	126,0	8,44
	2022	362	10,7	7,61	0,71	1,26	78,0	8,74
CO (ppm)	2020	330	0,44	0,30	0,67	0,04	1,74	0,36
	2021	357	0,84	0,71	0,84	0,00	4,28	0,69
	2022	236	0,87	0,78	0,89	0,00	3,89	0,69

Fonte: Autor (2025).

As Figuras 5.19 a 5.24 e as Tabelas 5.7 e 5.8 permitem a análise das concentrações dos poluentes atmosféricos monitorados na Estação PUC São Gabriel.

Comparando com as demais estações de monitoramento, a PUC São Gabriel foi aquela com o comportamento mais uniforme dos poluentes ao longo do tempo. Como exposto na tabela 5.6, os poluentes MP_{10} , $MP_{2,5}$, SO_2 e CO alcançaram resultados semelhantes no teste Wilcoxon com correção de Holm, dado que, para todos eles, houve diferença estatisticamente significativa nos anos 2020/2021 e 2020/2022, mas não entre 2021/2022. Além disso, todos estes poluentes tiveram as menores concentrações das medianas no ano de 2020 ($MP_{10} = 18,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $MP_{2,5} = 7,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $SO_2 = 4,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $CO = 0,36 \text{ ppm}$).

O NO_2 também teve suas menores medianas no ano de 2020 ($16,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), com a única diferença do teste de Wilcoxon ter acusado diferença significativa entre todos as combinações de anos.

Finalmente, o O_3 , como o NO_2 , apresentou diferença significativa entre todos os anos, apesar disso, foi o único poluente com as menores medianas em 2022 ($31,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), já as maiores ocorrem em 2020 ($39,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

A fim de resumir os resultados estatísticos obtidos em todas as estações de monitoramento, a Tabela 5.9 a seguir reúne todas as medianas dos poluentes, de acordo com o ano, e destaca quais foram os anos com as menores concentrações dos poluentes, de acordo com os resultados dos testes estatísticos.

Tabela 5.9 – Resumo das maiores e menores concentrações medianas dos poluentes nas Estações Centro, PUC Barreiro e PUC São Gabriel.

ESTAÇÃO	ANO	COCENTRAÇÃO MEDIANA DOS POLUENTES					
		MP ₁₀ (µg/m ³)	MP _{2,5} (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	CO (ppm)
CENTRO	2020	22,3	5,78	14,0	36,5	0,96	0,38
	2021	25,5	15,3	15,5	35,4	1,19	0,44
	2022	21,9	14,0	16,0	26,1	0,22	0,37
PUC BARREIRO	2020	22,1	12,5	24,4	51,2	5,58	0,50
	2021	24,2	16,5	23,4	42,3	9,13	0,35
	2022	24,5	13,3	22,9	34,0	5,21	0,50
PUC SÃO GABRIEL	2020	18,3	7,91	16,4	39,0	4,46	0,36
	2021	23,9	11,3	21,6	35,4	8,44	0,69
	2022	25,7	12,1	18,9	31,3	8,74	0,69

Legenda: Células verdes indicam a menor mediana de cada poluente em cada estação, com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; Teste de Wilcoxon com correção de Holm); Células azuis indicam as duas menores medianas de cada poluente em cada estação, com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; Teste de Wilcoxon com correção de Holm), mas sem diferença estatisticamente significativa entre elas ($p > 0,05$; Teste Wilcoxon com correção de Holm); Ausência de células coloridas de cada poluente em cada estação, indicam que não pode-se concluir sobre diferenças significativas entre os valores.

Fonte: Autor (2025).

De acordo com a interpretação da Tabela 5.9, nota-se que o ano de 2021 não apresentou casos de menores concentrações medianas, exceto quando não houve diferença estatisticamente significativa entre todos os anos, como aconteceu na Estação PUC Barreiro em relação aos poluentes MP_{10} e NO_2 , e também no caso do NO_2 da Estação Centro, que só apresentou diferença significativa entre uma combinação de anos, o que não permite chegar à uma conclusão sobre menores e maiores medianas.

Observa-se que o ano de 2020 foi o que apresentou as menores concentrações medianas em mais ocasiões, com 6 ocorrências de medianas mais baixas, todas com diferença significativa em relação aos outros anos. Além disso, em outras 5 ocasiões, 2020 teve menores concentrações, mas acompanhadas do ano de 2022, sem diferença significativa entre eles. Vale destacar que, além das situações em que as menores concentrações ocorreram tanto em 2020 quanto em 2022, o ano de 2022 teve mais 4 casos isolados, nos quais apresentou as menores medianas, com diferença significativa em relação aos demais anos.

Apesar de todos esses fatores, ao considerar as estações de monitoramento separadamente, não foi possível identificar um padrão consistente no comportamento das menores concentrações dos poluentes. Nas Estações Centro e PUC Barreiro, as menores concentrações foram mais distribuídas entre os anos de 2020 e 2022, com uma leve vantagem para 2022. Por outro lado, ao analisar a Estação PUC São Gabriel, fica claro que o ano de 2020 apresentou as menores concentrações, com uma diferença significativa em relação aos outros anos.

6. CONCLUSÕES

A análise dos efeitos das medidas de distanciamento social durante a pandemia da Covid-19 (2020-2022) na qualidade do ar de Belo Horizonte revelou resultados significativos, tanto em relação ao atendimento ao PI-1 da Resolução CONAMA nº 506/2024, que é equivalente ao PI-1 da Resolução CONAMA nº 491/2018, padrão vigente na época, quanto à comparação com os padrões finais estabelecidos pela OMS. De acordo com os dados apresentados, 99,98% das concentrações de poluentes respeitaram ao PI-1 da resolução, cujos valores correspondiam aos limites normativos aplicáveis ao período da coleta de dados, com a menor taxa de atendimento aos padrões observada para o MP₁₀ em 2020 (99,4%). Entretanto, ao utilizar os padrões finais, estabelecidos pela OMS, como referência, o atendimento médio aos padrões caiu para 97,27%, sendo o menor percentual registrado para o MP_{2,5} em 2021 (85,4%). Esses resultados indicam que, de forma geral, a qualidade do ar em Belo Horizonte foi satisfatória durante o período analisado.

Os resultados indicaram que as menores concentrações medianas de poluentes variaram entre os anos de 2020 e 2022 nas estações de monitoramento. Nas Estações Centro e PUC Barreiro, as menores concentrações medianas foram divididas entre esses dois anos, com uma ligeira predominância de menores valores em 2022. Destaca-se o comportamento do ozônio (O₃), que apresentou as menores concentrações medianas em 2022 em todas as estações avaliadas. O material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}) mostrou um comportamento diferente: as menores concentrações foram registradas em 2020, com exceção ao MP₁₀ na Estação Centro, que apresentou menores valores tanto em 2020 quanto em 2022, sem diferença estatística entre esses anos. O dióxido de nitrogênio (NO₂), por sua vez, teve diferenças estatisticamente significativas apenas na Estação PUC São Gabriel, enquanto nas demais não foi possível identificar um padrão consistente.

A Estação PUC São Gabriel apresentou o comportamento mais uniforme entre os poluentes ao longo dos anos, com menores concentrações medianas predominando em 2020. Já nas Estações Centro e PUC Barreiro, os resultados indicam maior variabilidade, com os menores valores distribuídos entre 2020 e 2022, o que reforça a complexidade das dinâmicas locais que influenciam a qualidade do ar no município.

Diante da metodologia utilizada no trabalho, os resultados não indicam uma melhora na qualidade do ar em Belo Horizonte nos períodos esperados, uma vez que as menores

concentrações ocorreram tanto em 2020, ano com medidas mais restritivas, quanto em 2022, quando as restrições já estavam bastante flexíveis. Além disso, 2021 foi consistentemente o ano com as maiores concentrações medianas de poluentes, evidenciando uma piora da qualidade do ar em relação aos outros dois anos analisados. Dessa forma, o estudo conclui que as variações observadas nas concentrações de poluentes não podem ser atribuídas exclusivamente às políticas de isolamento social, demandando análises mais amplas para avaliar os fatores que influenciam a qualidade do ar na cidade.

7. RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se a realização de estudos adicionais que explorem uma maior gama de fatores locais e regionais que possam influenciar a qualidade do ar em Belo Horizonte, incluindo condições meteorológicas, avaliações horárias e sazonais, emissões específicas de fontes industriais e veiculares, além de variações no uso do solo e no comportamento populacional durante a pandemia. Além disso, é essencial fortalecer o monitoramento da qualidade do ar, ampliando o número de estações de medição e garantindo a coleta de dados consistentes.

REFERÊNCIAS

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005. 318 p.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. **Diário oficial da União**: Brasília, DF, 15 jun. 1989.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 3, de 28 de julho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. **Diário oficial da União**: Brasília, DF, 28 jul. 1990.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário oficial da União**: Brasília, DF, 19 nov. 2018.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 506, de 05 de julho de 2024. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário oficial da União**: Brasília, DF, 05 jul. 2024.

CARMO, A.; PRADO, R. Qualidade do ar interno. 1999. **Texto técnico: Qualidade do ar interno**. Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Racine%20-%20IAQ.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2023.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Orientações para implementação e operação de programa de monitoramento automático da qualidade do ar**. Minas Gerais, 2011. Disponível em: https://www.feam.br/documents/d/feam/nota_tecnica_01-pdf-1. Acesso em: 20 de outubro de 2024.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2015. **Relatório Anual de Qualidade do Ar, ano base 2015**. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/2023/RELATORIOS_QUALIDADE_AR/monitoramento_da_qualidade_do_ar_2015.pdf. Acesso em: 12 de setembro de 2023.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Emissão veicular**. Minas Gerais, 2023a. Disponível em: <http://www.feam.br/qualidade-do-ar/-emissao-veicular>. Acesso em: 25 de setembro de 2023.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Qualidade do ar**. Minas Gerais, 2023b. Disponível em: <http://www.feam.br/qualidade-do-ar>. Acesso em: 25 de setembro de 2023.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Plano de Controle de Emissões Atmosféricas**. Minas Gerais, 2023c. Disponível em: <http://www.feam.br/qualidade-do-ar/-plano-de-controle-de-emissoes-atmosfericas-pceamg>. Acesso em: 25 de setembro de 2023.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Dados de monitoramento contínuo da qualidade do ar**. Minas Gerais, 2023d. Disponível em: <http://www.feam.br/qualidade-do-ar/dados>. Acesso em: 25 de setembro de 2023.

FENG, Z.; WANG, X.; YUAN, J.; ZHANG, Y.; YU, M. Changes in air pollution, land surface temperature, and urban heat islands during the COVID-19 lockdown in three Chinese urban agglomerations. **Science of The Total Environment**, v. 892, set. 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164496.

FIA – Fundação Instituto de Administração. **Pesquisa Gestão de Pessoas na Crise da COVID-19: Relatório Final**. Disponível em: <https://jornal.usp.br/wp-content/uploads/2020/11/Pesquisa-Gest%C3%A3o-de-Pessoas-na-Crise-de-Covid-19-ITA.pdf>. Acesso em: 12 de setembro de 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Belo Horizonte**. Belo Horizonte. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/panorama>. 2022. Acesso em: 16 março de 2024

INCA – Instituto Nacional de Câncer. Poluição do ar. **Conheça as principais fontes de poluição do ar, os efeitos à saúde e as medidas de controle**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/poluentes/poluicao-do-ar>. Acesso em: 10 de novembro de 2023.

IQAIR. **Air quality in Brazil**. 2022. Disponível em: <https://www.iqair.com/brazil>. Acesso em 7 de novembro de 2023.

JOHN HOPKINS UNIVERSITY. **Johns Hopkins coronavirus resource center**. Disponível em: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>. Acesso em: 25 setembro de 2023.

KONDA, A.; PRAKASH, A.; MOSS, G.; SCHMOLDT, M.; GRANT, G.; GUHA, S. Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks. **ACS Nano**, v. 14, n. 5, p. 6339-6347 abr. 2020. DOI: 10.1021/acsnano.0c03252.

LIU, F.; WANG, M.; ZHENG, M. Effects of COVID-19 lockdown on global air quality and health. **Science of The Total Environment**, v. 755, fev. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142533.

LOVISI, P. Ar de BH fica 45% mais limpo com o isolamento social. **Estado de Minas**, Belo Horizonte, 5 maio 2020. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2020/05/05/interna_gerais,1144584/ar-de-bh-fica-45-mais-limpo-com-o-isolamento-social.shtml. Acesso em: 20 setembro. 2023.

MALLAKPOUR, S.; AZADI, E.; HUSSAIN, C. M. Protection, disinfection, and immunization for healthcare during the COVID-19 pandemic: Role of natural and synthetic macromolecules. **Science of The Total Environment**, v. 776, jul. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145989.

MACINTYRE, C.; CHUGHTAI, A. A rapid systematic review of the efficacy of face masks and respirators against coronaviruses and other respiratory transmissible viruses for the community, healthcare workers and sick patients. **International Journal of Nursing Studies**, v. 108, ago. 2020. DOI:10.1016/j.ijnurstu.2020.103629.

MINAS GERAIS. **Decreto nº 113, de 12 de março de 2020**. Declara SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA em Saúde Pública no Estado em razão de surto de doença respiratória – 1.5.1.1.0 – Coronavírus e dispõe sobre as medidas para seu enfrentamento, previstas na Lei Federal nº 13.979, de 6 de fevereiro de 2020. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DNE/113/2020/?cons=1>. Acesso em 15 de setembro de 2023.

MINAS GERAIS. **Decreto nº 17.304, de 18 de março de 2020**. Determina a suspensão temporária dos Alvarás de Localização e Funcionamento e autorizações emitidos para realização de atividades com potencial de aglomeração de pessoas para enfrentamento da Situação de Emergência Pública causada pelo agente Coronavírus–COVID-19. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DNE/113/2020/?cons=1>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

NAKADA, L.; URBAN, R. COVID-19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 730, ago. 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139087.

NIGAM, R.; PANDYA, K.; LUIS, A.; SENGUPTA, R.; KOTHA, M. Positive effects of COVID-19 lockdown on air quality of industrial cities (Ankleshwar and Vapi) of Western India. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 19 fev. 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-83393-9.

NOËL, C.; VANROELEN, C.; GADEYNE, S. Qualitative research about public health risk perceptions on ambient air pollution. A review study. **SSM - Population Health**, v. 15, set. 2021. DOI: 10.1016/j.ssmph.2021.100879.

OPAS - Organização Pan-Americana da saúde. **Histórico da pandemia de COVID-19**. 2021. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/22-9-2021-novas-diretrizes-globais-qualidade-do-ar-da-oms-visam-salvar-milhoes-vidas-da>. Acesso em: 27 outubro de 2023.

OPAS - Organização Pan-Americana da saúde. **Novas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS visam salvar milhões de vidas da poluição atmosférica**. 22 de setembro de 2021. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/22-9-2021-novas-diretrizes-globais-qualidade-do-ar-da-oms-visam-salvar-milhoes-vidas-da>. Acesso em: 27 outubro de 2023.

QUADROS, M.; LISBOA, H.; OLIVEIRA, V.; SCHIRMER, W. Qualidade do ar em ambientes internos hospitalares: estudo de caso e análise crítica dos padrões atuais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 431–438, set. 2009.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Versão atual. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 10 de dezembro de 2025.

REINHARDT, É. L. Transmissão da COVID-19: um breve reexame das vias de transmissão por gotículas e aerossóis. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 47, 2022. DOI: 10.1590/2317-6369000000221.

MARTIN, M.; MARTIN, M. Condições Atuais Das Emissões Dos Poluentes Atmosféricos Durante A Quarentena Da Covid-19 E As Perspectivas Futuras. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 2, n. 5, p. 85–96, 26 abr. 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3767111.

SANTOS, T.; CARVALHO, V.; REBOITA, M. Avaliação da influência das condições meteorológicas em dias com altas concentrações de material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 307–313, jun. 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016139269.

SANTOS, U.; ARBEX, M. A.; BRAGA, A. L. F.; MIZUTANI, R. F.; CANÇADO, J. E. D.; TERRA-FILHO, M.; CHATKIN, J. M. Environmental air pollution: respiratory effects. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 47, n. 1, 2021. DOI: 10.36416/1806-3756/e20200267

SIMONI, W. F.; SANT'ANNA, A.; ALENCAR, A.; PINHEIRO, B.; ARAÚJO, C.; VORMITTAG, E.; WICHER, H.; BORGES, K.; FARIA, M.; ANDRADE, M. F.; PORTO, P.; ARTAXO, P.; ROCHA, R.; ESTURBA, T.; SIMONI, W. F. (coord.). **O estado da qualidade do ar no Brasil**. Working Paper. São Paulo, Brasil: WRI Brasil, 2021. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-o-estado-da-_qualidade-do-ar-no-brasil.pdf. Acesso em: 12 de novembro de 2023.

SEKAR, A.; JASNA, R. S.; BINOY, B. V.; MOHAN, P.; VARGHESE, G. K. Air quality change and public perception during the COVID-19 lockdown in India. **Gondwana Research**, v. 114, p. 15-29, fev. 2023. DOI: 10.1016/j.gr.2022.04.023.

SILVA, A.; BRANCO, P.; SOUSA, S. Impact of COVID-19 Pandemic on Air Quality: A Systematic Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 4, p. 1950, 1 jan. 2022. DOI: 10.3390/ijerph19041950.

SILVER, B.; HE, X.; ARNOLD, S. R.; SPRACKLEN, D. V. The impact of COVID-19 control measures on air quality in China. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 8, 28 jul. 2020. DOI:10.1088/1748-9326/aba3a2.

ZHU, N.; ZHANG, D.; WANG, W.; LI, X.; YANG, B.; SONG, J.; ZHAO, X.; HUANG, B.; SHI, W.; LU, R.; NIU, P.; ZHAN, F.; MA, X.; WANG, D.; XU, W.; WU, G.; GAO, G. F.; TAN, W. A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. **New England Journal of Medicine**, v. 382, n. 8, 24 jan. 2020. DOI: 10.1056/NEJMoa2001017.