



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

**MONITORAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO NA REGIÃO
METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE: ANÁLISE DE DADOS DE DUAS
ESTAÇÕES FIXAS – 2009 A 2023**

Bruno Cordeiro Rocha Barroso

**Belo Horizonte
2025**

Bruno Cordeiro Rocha Barroso

**MONITORAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO NA REGIÃO
METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE: ANÁLISE DE DADOS DE
MONITORAMENTO DE DUAS ESTAÇÕES FIXAS - 2009 A 2023**

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: Profa. Dra. Patrícia Sueli de Rezende

Belo Horizonte
2025

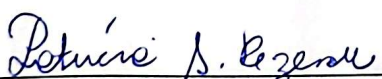
BRUNO CORDEIRO ROCHA BARROSO

**MONITORAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO NA REGIÃO
METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE:
Análise de dados de duas estações fixas – 2009 a 2023**

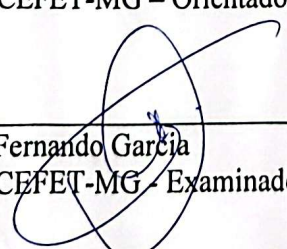
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 18 de Julho de 2025.

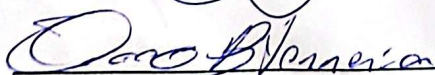
Banca examinadora:



Patrícia Sueli de Rezende – Presidente da Banca Examinadora
Prof. Dr. - CEFET-MG – Orientadora



Cleverson Fernando Garcia
Prof. Dr. - CEFET-MG - Examinador



Tiago Bórges Ferreira
Prof. Dr. - CEFET-MG - Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus amigos, meu namorado e familiares pelo apoio ao longo dessa jornada cheia de imprevistos. O suporte foi essencial para que as barreiras fossem ultrapassadas e as dificuldades fossem, ao menos, um pouco mais leves.

Agradeço aos colegas que vivenciaram comigo o curso, uma vez que se não fosse por vocês, a trajetória seria, certamente, bem mais cansativa. Obrigado pela disponibilidade, trocas e acolhimento nos melhores e piores momentos!

Agradeço aos colegas do meu estágio na ARSAE-MG, meu primeiro e único estágio ao longo da graduação, onde pude aprender tanto e vivenciar o contexto profissional de modo pleno. Muito obrigado por todos os ensinamentos e vivências!

Agradeço ao CEFET-MG, por ser um ambiente acolhedor, dentro das possibilidades. Agradeço por ser um ambiente de trocas e interações, possibilitando a minha transformação contínua como um ser humano que se vê como parte do ambiente, valoriza as políticas públicas e o ensino gratuito e de qualidade. Agradeço também aos professores por todo o conhecimento compartilhado, incentivos e conselhos, tão necessários para que algumas escolhas fossem feitas com maior prudência.

Agradeço à minha orientadora, professora Dra. Patrícia Sueli de Rezende, por aceitar me orientar neste trabalho de conclusão de curso e reta final da graduação, e, além disso, por ter paciência e compreensão com o ritmo que consegui desenvolver o trabalho, sendo sempre gentil e acolhedora!

Agradeço também aos professores Dr. Cleverson Garcia e Dr. Tiago Borges por aceitarem compor a banca avaliadora deste trabalho e pelas contribuições.

RESUMO

BARROSO, BRUNO CORDEIRO ROCHA. **Monitoramento de Material Particulado na Região Metropolitana de Belo Horizonte: Análise de Dados de Duas Estações Fixas - 2009 a 2023.** 2025. 78p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

A qualidade do ar é essencial para o bem-estar humano, assim como para a preservação ambiental. Por outro lado, a poluição atmosférica é a causa de mais de 7 milhões de mortes prematuras no mundo todos os anos. Os setores industriais e de transportes são os principais atores para as emissões de poluentes nos grandes centros urbanos. Desse modo, é necessário compreender qual é o comportamento dos principais poluentes atmosféricos considerando-se diferentes cenários. Este estudo se dedicou a avaliar dados de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), a terceira maior região em termos populacionais do país e um dos principais polos industriais do Brasil. Foram analisados dados oriundos de duas estações fixas de monitoramento da qualidade do ar ao longo do período de 2009 a 2023, com foco na concentração de material particulado inalável (MP₁₀), tamanhos de até 10 micrômetros, e, na busca de correlações deste poluente com variáveis meteorológicas como temperatura, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento, empregando análises estatísticas uni e multivariadas, para discussão dos resultados obtidos. Por meio dos resultados, percebeu-se que o contexto industrial refletiu de forma mais consistente em relação à concentração do poluente, sendo os valores obtidos na estação Petrovale, localizada em Betim, majoritariamente superiores aos valores obtidos na estação Delegacia Amazonas, localizada em Belo Horizonte. Também observou-se influência dos fatores climáticos e sazonais na concentração do MP₁₀ na região, uma vez que há concentrações mais elevadas no inverno, período caracterizado por baixa umidade, ventos fracos e incidência de inversões térmicas. Adicionalmente, houve diminuição das concentrações de MP₁₀ durante o período de *lockdown* devido à pandemia de COVID-19. Este estudo evidencia a importância do monitoramento da qualidade do ar e da interpretação dos dados obtidos para compreensão dos fatores que impactam a qualidade do ar da RMBH e para fomentar a adoção assertiva de medidas para o controle das emissões atmosféricas.

Palavras-chave: Material Particulado Inalável. Poluição Atmosférica. Qualidade do Ar. RMBH.

ABSTRACT

BARROSO, BRUNO CORDEIRO ROCHA. Monitoring of Particulate Matter in the Metropolitan Region of Belo Horizonte: Data Analysis from Two Fixed Stations – 2009 to 2023. 2025. 78 pages. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

Air quality is essential for human well-being as well as for environmental preservation. On the other hand, air pollution is responsible for more than 7 million premature deaths worldwide every year. The industrial and transportation sectors are the main contributors to pollutant emissions in large urban centers. Therefore, it is necessary to understand the behavior of major atmospheric pollutants under different scenarios. This study aimed to evaluate air quality monitoring data in the Metropolitan Region of Belo Horizonte (RMBH), the third largest region in population terms in the country and one of the main industrial hubs in Brazil. Data from two fixed air quality monitoring stations were analyzed over the period from 2009 to 2023, with a focus on particulate matter up to 10 micrometers (PM₁₀) concentration and on identifying correlations between this pollutant and meteorological variables such as temperature, relative humidity, precipitation, and wind speed, employing univariate and multivariate statistical analyses to support the discussion of the results obtained. The results show that the industrial context had a more consistent influence on pollutant concentrations, with values from the Petrovale station, located in Betim, generally higher than those from the Delegacia Amazonas station, located in Belo Horizonte. It was also observed that climatic and seasonal factors have a strong influence on PM₁₀ concentrations in the region, with higher concentrations occurring in winter, a season characterized by low humidity, weak winds, and thermal inversion events. Another relevant factor observed was the decrease in PM₁₀ concentrations during the lockdown period due to the COVID-19 pandemic. This study highlights the importance of air quality monitoring and of interpreting the data obtained in order to understand the factors that impact air quality in the RMBH and to support the assertive adoption of measures to control atmospheric emissions.

Keywords: Inhalable Particulate Matter. Air Pollution. Air Quality. RMBH.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Poluição Atmosférica	21
3.2	Material Particulado Atmosférico	24
3.3	Legislação Aplicável	27
3.3.1	<i>Histórico da Legislação Ambiental e Qualidade do Ar no Brasil</i>	27
3.3.2	<i>Padrões da Qualidade do Ar</i>	29
3.3.3	<i>Monitoramento da Qualidade do Ar</i>	32
3.4	Poluição Atmosférica e a Pandemia de COVID-19	33
3.5	Tratamento Estatístico dos Dados	35
3.5.1	<i>Estatística Descritiva</i>	35
3.5.2	<i>Boxplots</i>	35
3.5.3	<i>Correlação de Pearson</i>	37
3.5.2	<i>Análises Multivariadas – PCA e HCA</i>	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	Área de Estudo	38
4.2	Análises Estatísticas e Tratamento de Dados	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	Estatística Descritiva	44
5.2	Análise da Correlação Linear	50
5.3	Gráficos de Dispersão	51
5.3.1	<i>Período Temporal</i>	51
5.3.2	<i>Variáveis Meteorológicas</i>	63
5.4	Análise Multivariada – Gráficos de HCA e PCA	64
5.4.1	<i>PCA</i>	65
5.3.2	<i>HCA</i>	66

6	CONCLUSÕES.....	70
7	REFERÊNCIAS.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos materiais particulados atmosféricos por tamanho e fonte.....	24
Figura 2 - Penetração do material particulado inalável no sistema respiratório humano....	25
Figura 3 - Comparação de materiais particulados inaláveis a um fio de cabelo e um grão de areia.....	26
Figura 4 - Estabelecimento e Avaliação dos Padrões de Qualidade do Ar como ferramenta de Gestão da Qualidade do Ar.....	30
Figura 5 - Estrutura de um boxplot e seus componentes.....	36
Figura 6 – Representação de um dendrograma.....	38
Figura 7 – Localização das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte.....	40
Figura 8 – Localização das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar em Betim - MG.....	41
Figura 9 – Localização das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar em Belo Horizonte - MG.....	41
Figura 10 – Fluxograma da metodologia do tratamento de dados deste trabalho.....	43
Figura 11 – Boxplots contendo a concentração de MP ₁₀ na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, por estação do ano, situada em Belo Horizonte/MG, entre os anos de 2015 e 2018.....	46
Figura 12 – Boxplots contendo a concentração de MP ₁₀ na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, por estação do ano, situada em Belo Horizonte/MG, entre os anos de 2019 e 2021.....	46
Figura 13 – Boxplots contendo a concentração de MP ₁₀ na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, por estação do ano, situada em Betim/MG, entre os anos de 2009 e 2012.....	47
Figura 14 – Boxplots contendo a concentração de MP ₁₀ na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, por estação do ano, situada em Betim/MG, entre os anos de 2013 e 2016.....	47
Figura 15 – Boxplots contendo a concentração de MP ₁₀ na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, por estação do ano, situada em Betim/MG, entre os anos de 2017 e 2020.....	48
Figura 16 – Boxplots contendo a concentração de MP ₁₀ na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, por estação do ano, situada em Betim/MG, entre os anos de 2021 e 2023.....	48
Figura 17 – Matriz de correlação de Pearson entre MP ₁₀ e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG.....	50
Figura 18 – Matriz de correlação de Pearson entre MP ₁₀ e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG.....	51

Figura 19 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2015.....	52
Figura 20 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2016.....	52
Figura 21 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2017.....	52
Figura 22 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2018.....	53
Figura 23 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2019.....	54
Figura 24 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2020.....	54
Figura 25 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2009.....	55
Figura 26 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2010.....	55
Figura 27 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2011.....	56
Figura 28 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2012.....	56
Figura 29 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2013.....	57
Figura 30 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2014.....	57
Figura 31 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2015.....	58
Figura 32 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2016.....	58

Figura 33 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2017.....	59
Figura 34 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2018.....	59
Figura 35 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2019.....	60
Figura 36 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2020.....	60
Figura 37 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2021.....	61
Figura 38 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2022.....	61
Figura 39 – Variação de concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2023.....	62
Figura 40 – Gráficos de dispersão relacionando MP_{10} e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG.....	63
Figura 41 – Gráficos de dispersão relacionando MP_{10} e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG.....	64
Figura 42 – PCA entre MP_{10} e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG.....	65
Figura 43 – PCA entre MP_{10} e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG.....	65
Figura 44 – Dendrograma da estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas relacionando as variáveis meteorológicas e a concentração de MP_{10} , situada em Belo Horizonte.....	66
Figura 45 – Dendrograma da estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG, relacionando o período avaliado com relação às concentrações de MP_{10}	67
Figura 46 – Dendrograma da estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG, relacionando as variáveis meteorológicas e a concentração de MP_{10}	67

Figura 47 – Dendrograma da estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG, relacionando o período avaliado com relação às concentrações de MP_{10}68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões de qualidade do ar conforme a resolução CONAMA nº 491/2018.....	31
Tabela 2 - Padrões de qualidade do ar conforme a resolução CONAMA nº 506/2024.....	32
Tabela 3 – Estatística descritiva da estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG.....	44
Tabela 4 – Estatística descritiva da estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ARSAE-MG	Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário de Minas Gerais
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CO	Monóxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
DP	Desvio padrão
DPOC	Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica
GEEs	Gases de Efeito Estufa
HCA	Análise de Agrupamento Hierárquico (do inglês, <i>Hierarchical Cluster Analysis</i>)
HIV	Vírus da Imunodeficiência Humana
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
Km	Quilômetro
MERS-CoV	Síndrome Respiratória do Oriente Médio
MP	Material Particulado
MP ₁₀	Material Particulado de até 10 micrômetros
MP _{2,5}	Material Particulado de até 2,5 micrômetros
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₃	Ozônio
NQA/SEMAD	Núcleo de Monitoramento do Ar e Emissões da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas

PCA	Análise de Componentes Principais (do inglês <i>Principal Component Analysis</i>)
PM ₁₀	Particulate Matter up to 10 micrometers
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículo Automotores
PRONAR	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
PTS	Partículas Totais em Suspensão
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
SARS-CoV	Síndrome Respiratória Aguda Grave
SEMA	Secretaria Especial de Meio Ambiente
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SO ₂	Dióxido de Enxofre

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é definida como a alteração do equilíbrio atmosférico, sendo acrescentadas substâncias que possam trazer efeitos prejudiciais à população humana, fauna e flora (Silva; Vieira, 2017). Em meio aos danos causados à saúde humana e ao meio ambiente, destacam-se a acidificação de rios e solos, aumento de problemas de saúde, principalmente respiratórios e vasculares, redução do bem-estar, além de impactos nas mudanças climáticas (Moreira *et al.*, 2015).

A partir da Revolução Industrial, a poluição atmosférica passou a atingir a população em larga escala. Além disso, o aumento da urbanização propiciou a elevação das emissões por parte da queima de combustíveis fósseis, sejam elas provenientes de fontes fixas, como as indústrias, ou fontes móveis, tais como as emissões veiculares (Santos *et al.*, 2019).

A emissão expressiva de poluição atmosférica na primeira metade do século XX ocasionou episódios com aumento considerável de mortes na Europa e nos Estados Unidos. Como um dos primeiros registros da época, destaca-se o caso das cidades de Huy e Liège, na Bélgica, regiões com forte presença de indústrias. Em dezembro de 1930, houve condições meteorológicas desfavoráveis, tais como a ausência de ventos, impedindo a dispersão dos poluentes e levando a uma elevação dos casos de doenças respiratórias e mortes nos dias seguintes. De modo semelhante, em outubro de 1948 a cidade de Donora, na Pensilvânia, os poluentes ficaram retidos nas camadas atmosféricas mais baixas devido a ocorrência de inversões térmicas, fenômeno no qual camadas de ar frio impedem as massas de ar quente próximas à superfície de subirem e, assim, se dispersarem. Foram registradas 20 mortes no período na comunidade de aproximadamente 14 mil pessoas (Braga; Pereira; Saldiva, 2002).

Um dos casos mais alarmantes de poluição atmosférica ocorreu em Londres, Inglaterra, no inverno de 1952. Ao longo de 5 dias, a cidade ficou coberta por uma neblina contendo expressiva concentração de materiais particulados e outros poluentes, principalmente dióxido de enxofre, advindos das emissões de fontes veiculares, industriais e domiciliares. O número de mortes resultantes desse evento foi superior a 4000 pessoas (Zhang; Liu; Li, 2014).

Pesquisas recentes têm alertado para o crescimento do número de mortes evitáveis relacionadas à intensa poluição atmosférica no Brasil e no mundo. As mortes relacionadas à poluição atmosférica no país têm aumentado nos últimos dez anos, segundo o Ministério da Saúde (Brasil, 2022). Ademais, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que mais de 7 milhões de mortes prematuras são atribuídas à poluição do ar, predominantemente nos países de baixa e média renda do Pacífico e Sudeste Asiático (OMS, 2025). Além disso, segundo o relatório anual *Air Quality Life Index* mais recente, a poluição atmosférica é uma ameaça tão grande quanto a epidemia de HIV, ou a malária na África Central e Ocidental (EPIC, 2024). Esses impactos demonstram-se mais acentuados nas cidades as quais apresentam intensas atividades industriais e grandes concentrações populacionais (Corá *et al.*, 2020).

A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) é uma das regiões brasileiras mais ricas em recursos minerais, a população da região corresponde a aproximadamente 40% da população do estado de Minas Gerais e responde por cerca de 34% do produto interno bruto do estado. A região conta com grande frota veicular, além da área industrial, compondo a origem mista da poluição atmosférica da área (Gouveia *et al.*, 2019).

Historicamente, a RMBH passou por importantes mudanças econômicas desde o seu surgimento na década de 1970. A expansão das atividades industriais, juntamente à dinâmica imobiliária e de transporte da região, propiciou uma grande concentração de atividades econômicas e oportunidades de empregos levando ao crescente aumento da sua população (Pinho, 2016). Tendo em vista esse crescimento, a região também foi afetada pelo aumento da poluição devido às emissões atmosféricas advindas das atividades produtivas e meios de transportes.

Aliando-se às mudanças climáticas, as quais ocasionam períodos de grandes estiagens ou precipitações intensas, e à pandemia de COVID-19, cuja natureza resultou em grandes mudanças comportamentais da população mundial durante o período, é necessário entender o impacto dos principais poluentes atmosféricos para a saúde. Além disso, a concentração de poluentes varia de acordo com as características específicas de cada localidade, como proximidade de áreas industriais, densidade populacional e padrão de uso do solo, resultando em oscilações nos níveis de poluição. Diante disso, este estudo objetiva analisar dados de

duas estações fixas de monitoramento de qualidade do ar da RMBH em um espaço temporal entre 2009 e 2023 a fim de entender as correlações entre as adversidades do período analisado e as concentrações de material particulado inalável (MP_{10}) na atmosfera da região.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as variações de concentração de material particulado inalável (MP₁₀) na RMBH ao longo dos anos, no período compreendido entre 2009-2023, e, verificar possíveis correlações com parâmetros meteorológicos, fatores climáticos e possíveis causas a impactar nas tendências observadas.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar variações sazonais de concentração de MP₁₀, considerando variação mensal no período selecionado (2009-2023);
- Realizar análises estatísticas relativas aos dados de monitoramento e dados meteorológicos visando verificar se há correlação entre esses fatores;
- Avaliar o impacto do período da pandemia de COVID-19 nos anos 2020 e 2021 em relação à concentração do poluente MP₁₀ no período observado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Poluição Atmosférica

A atmosfera terrestre é uma camada constituída por gases (nitrogênio, oxigênio, argônio e gás carbônico), vapor d'água, aerossóis (materiais particulados) e radiação, que envolve a Terra, sendo seus limites inferiores delimitados pela crosta terrestre e oceanos. A atmosfera terrestre se estende até mais de 500 km de altitude e está subdividida em 5 camadas, sendo que a maior parte de seus componentes e de sua massa está localizada na camada mais próxima da superfície, que atinge entre 10 e 12 quilômetros, chamada de troposfera. Além disso, é importante destacar que nesta camada ocorrem os fenômenos de poluição e é a responsável pelas condições climáticas do planeta. Ademais, outra camada importante para questões ambientais é a segunda camada, a estratosfera, uma vez que é onde se localiza a camada de ozônio, responsável pela retenção da radiação ultravioleta curta proveniente do sol (Braga, 2005).

Define-se poluente atmosférico, segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na Resolução 506/2024, como matéria ou energia de qualquer forma que estejam em quantidade, intensidade, tempo, concentração ou características em desacordo com os níveis seguros estabelecidos e que possam tornar, ou tornem, o ar nocivo, impróprio ou ofensivo à saúde pública, prejudicando a fauna, flora e o bem-estar público (Brasil, 2024). Pode-se classificar a poluição atmosférica quanto ao seu alcance e impactos, considerando-se cinco diferentes escalas: local, urbana, regional, continental e global (Martins; Arbilla, 2022).

A escala local associa-se à emissão de uma ou mais fontes em uma área, abrangendo uma região de até 5 km da origem, sendo seus impactos dependentes da altura de lançamento dos poluentes por parte da fonte das emissões e também das condições atmosféricas e topográficas locais. A dispersão dos poluentes é mais difícil quanto mais próxima da superfície essa emissão ocorrer, sendo também agravada quando as condições topográficas e meteorológicas não forem favoráveis. A escala urbana estende-se até 50 km e resulta da emissão direta dos poluentes primários de uma determinada região combinando-se com a reação entre esses poluentes, originando os poluentes secundários, tais como o ozônio

troposférico. A escala regional compreende o alcance entre 50 a 500 km de área, sendo composta pela combinação de emissões de diferentes cidades contendo tanto poluentes primários de diferentes setores quanto poluentes secundários provenientes das interações desses poluentes. A escala continental abrange áreas entre 500 a 1000 km, constituindo-se de poluentes primários e secundários advindos de diferentes cidades e/ou países, tendo como destaques a formação de chuva ácida, originada pela emissão de dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio. Por fim, tem-se a escala global, a qual resulta da emissão e dispersão de poluentes persistentes na atmosfera podendo ser transportados por distâncias consideráveis, podendo afetar todo o planeta e diferentes camadas da atmosfera. Essa escala tem como consequências a depleção da camada de ozônio estratosférico, a presença de poluentes persistentes nas mais diversas áreas do planeta e a intensificação do efeito estufa (Martins; Arbilla, 2022).

A poluição do ar não é um problema recente, uma vez que há registros na história antiga de reclamações sobre o assunto em Roma há mais de 2 mil anos. Na Inglaterra, no século XIII, houve diversos esforços para conter fumaças devido às queimas de carvão mineral, entretanto não foram alcançados os resultados esperados, inclusive tendo sido registrado o aumento do consumo do carvão (Braga, 2005). Com a Revolução Industrial, as emissões se intensificaram devido ao aumento da demanda por fontes energéticas e uso de combustíveis fósseis, uma vez que o mundo não mais estava sendo modificado para a sobrevivência, e sim, priorizando interesses econômicos a danos ambientais (Silva; Vieira, 2017).

Episódios agudos de contaminação do ar por poluentes fortaleceram a relação entre danos à saúde e a intensificação da poluição atmosférica, tais como as milhares de mortes registradas na área industrial de Londres entre os anos de 1948 e 1952. Ademais, no Brasil também pode-se observar que o crescimento desordenado na Região Metropolitana de São Paulo, em especial na região do ABC, após a Segunda Guerra Mundial, propiciou a instalação de grandes indústrias em detrimento de mecanismos para o devido controle de emissão de poluentes atmosféricos levando a visualização de expressivas quantidades de fumaça advindas das chaminés. Em decorrência desses eventos, foram registrados episódios agudos de poluição atmosférica causando mal-estar na população e exaurindo a capacidade dos serviços médicos de emergência da região paulista (CETESB, 2022).

Registros históricos apontam episódios de intensificação da poluição, e consequentemente um grande aumento de mortes nas regiões afetadas, como foi o caso de cidades como Donora, na Pensilvânia, nos Estados Unidos, onde uma nuvem espessa de poluição cobriu a cidade em 1948 e levou dezenas de pessoas à morte, além de afetar mais de 5900 pessoas na cidade com sintomas graves, moderados ou leves (Jacobs; Burgess; Abbott, 2018). Também é válido ressaltar Londres, na Inglaterra, a qual, no inverno de 1952, foi acometida por uma neblina tóxica ao longo de 5 dias devido à alta concentração de poluentes ocasionando a morte de mais de 4 mil pessoas em decorrência de complicações respiratórias e cardíacas (Silva; Vieira, 2017). No Brasil, a cidade de Cubatão, em São Paulo, sede de dezenas de indústrias, era conhecida como “Vale da Morte” nos anos 80, por causa dos níveis alarmantes de poluição atmosférica observados, chegando a números dez vezes maiores que os recomendados pela Organização Mundial da Saúde e a alta incidência de doenças respiratórias na região (CETESB, 2024).

A poluição atmosférica é um problema global com impactos graves na saúde humana e no meio ambiente. A emissão de poluentes tem aumentado significativamente, impulsionada pelo crescimento populacional, pela urbanização e pelo uso de combustíveis fósseis. Esses poluentes são provenientes de fontes diversas, como indústrias, veículos automotores, usinas termoelétricas, e até fontes naturais, como erupções vulcânicas. Eles incluem partículas sólidas e líquidas, além de gases como dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), ozônio (O_3) e compostos orgânicos voláteis (Santos *et al.*, 2019).

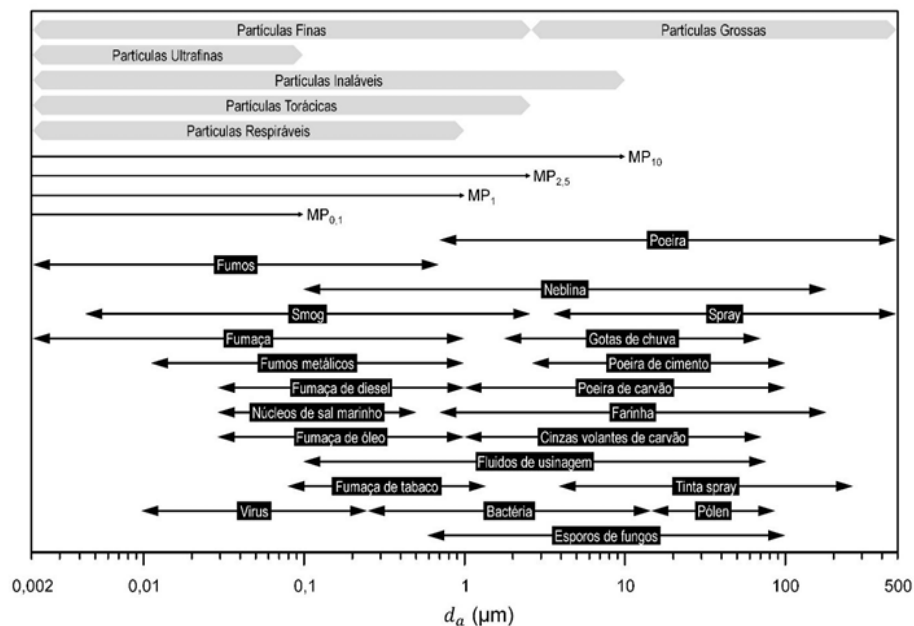
A complexidade da poluição do ar reside na interação entre poluentes primários, emitidos diretamente na atmosfera, e secundários, formados na própria atmosfera em decorrência de reações químicas. Essa diversidade de poluentes contribui para uma ampla gama de efeitos adversos, desde doenças respiratórias até problemas cardiovasculares, além de impactos na biodiversidade e nas mudanças climáticas. Com isso, o monitoramento e a análise desses poluentes são muito importantes para compreender suas origens, comportamentos e consequências (Santos *et al.*, 2019). Além disso, dada a gravidade da situação, há uma contínua discussão sobre os efeitos nocivos da poluição atmosférica, mesmo nos níveis considerados seguros ante à legislação vigente (Braga *et al.*, 2001).

A expressiva urbanização em todo o planeta trouxe consigo o aumento do consumo energético e das emissões de poluentes advindos da queima de combustíveis fósseis por fontes fixas, tais como indústrias, e fontes móveis, como veículos automotores (Santos *et al.*, 2019). A taxa de urbanização no Brasil ficou acima de 68% nos anos 80, e esse número hoje subiu ainda mais. Os dados mais recentes divulgados pelo Censo Demográfico 2022, constataram que do total de 203,1 milhões de pessoas que moram no país, 177,5 milhões (87,4%) vivem em áreas urbanas (IBGE, 2024). É possível notar esses números de muitos modos, entre eles a diminuição da qualidade do ar e o aumento das doenças respiratórias. As faixas etárias mais atingidas são as crianças e os idosos, grupos bastante suscetíveis aos efeitos da poluição (Santos *et al.*, 2019).

3.2 Material Particulado Atmosférico

Os materiais particulados (MP) são uma das mais preocupantes formas de poluição do ar, compostos por partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera. Eles podem variar significativamente em tamanho, composição química e origem, sendo classificados conforme seu diâmetro aerodinâmico (Santos *et al.*, 2019). Pode-se observar na Figura 1 a classificação de diferentes materiais particulados por tamanho e composição.

Figura 1 - Classificação dos materiais particulados atmosféricos por tamanho e fonte.

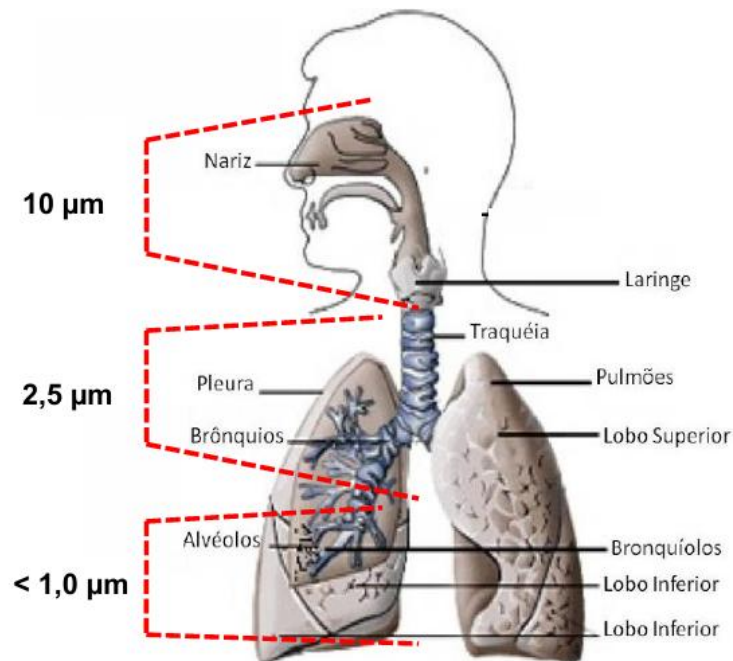


Fonte: Brito *et al.* (2018).

As partículas totais em suspensão (PTS) compreendem o grupo de partículas com diâmetros menores que 50 micrômetros (Santos *et al.*, 2019). Parte considerável dessas partículas é inalável e prejudicial à saúde humana, afetando também a qualidade de vida da população, uma vez que afeta as condições estéticas do ambiente e prejudica a normalidade das atividades rotineiras da comunidade (CETESB, 2025).

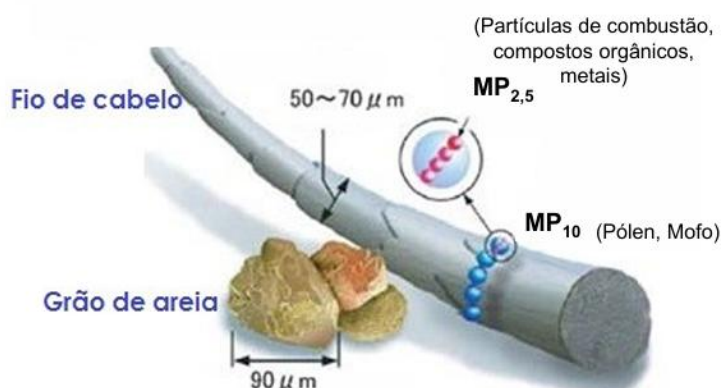
Por outro lado, as partículas inaláveis são subdivididas em inaláveis (MP_{10}), com diâmetro aerodinâmico menor que 10 micrômetros, e finas ($MP_{2,5}$), com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros, também chamadas de partículas respiráveis (Silva; Vieira, 2017). As partículas com menos de 10 micrômetros (MP_{10}) e as menores que 2,5 micrômetros ($MP_{2,5}$) são as mais estudadas devido ao seu potencial de causar danos à saúde humana e ao meio ambiente por penetrar mais profundamente no sistema respiratório (Santos *et al.*, 2019). Na Figura 2 pode ser visto o potencial de penetração dos materiais particulados no corpo humano de acordo com seu tamanho. Na Figura 3 estão representados os tamanhos dos particulados MP_{10} e $MP_{2,5}$ em relação a outros elementos para uma noção de escala.

Figura 2 - Penetração do material particulado inalável no sistema respiratório humano.



Fonte: Adaptado de Marques; Santos (2012).

Figura 3 - Comparação de materiais particulados inaláveis a um fio de cabelo e um grão de areia.



Fonte: Adaptado de Environmental Protection Agency – United States (2019).

As fontes de materiais particulados incluem tanto atividades antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis e biomassa, quanto processos naturais, como erupções vulcânicas e tempestades de poeira. Devido ao seu pequeno tamanho, os particulados podem penetrar profundamente no sistema respiratório, transportando compostos químicos tóxicos e causando inflamações, estresse oxidativo e doenças crônicas, como asma, DPOC (Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica) e câncer de pulmão. Esses impactos tornam o monitoramento e a análise desses poluentes essenciais para a saúde pública e a gestão ambiental (Santos *et al.*, 2019).

A exposição a MP, especialmente MP₁₀, constitui um relevante fator de risco à saúde pública, conforme demonstrado por evidências epidemiológicas e toxicológicas. Como destacado por Braga *et al.* (2007), essas partículas estão associadas ao incremento na mortalidade por doenças respiratórias, tais como asma e DPOC, e cardiovasculares. Os efeitos decorrem principalmente de dois mecanismos inter-relacionados: a indução de estresse oxidativo no trato respiratório, mediado pela geração de espécies reativas de oxigênio que causam danos celulares, e o desencadeamento de inflamação sistêmica, promovida por componentes tóxicos dos MP (como metais e endotoxinas) que disseminam processos inflamatórios pulmonares para a corrente sanguínea. As populações mais vulneráveis, como idosos, crianças e portadores de comorbidades, apresentam maior suscetibilidade a esses efeitos. Dessa forma, o controle das emissões de material particulado configura-se como medida essencial de gestão da qualidade do ar para a proteção da saúde coletiva.

3.3 Legislação Aplicável

3.3.1 *Histórico da Legislação Ambiental e Qualidade do Ar no Brasil*

A qualidade do ar é um assunto extremamente debatido nas discussões recentes relativas ao meio ambiente, uma vez que seus impactos são consideráveis tanto na saúde pública quanto no meio ambiente (OMS, 2021). Dado o formato das legislações brasileiras a respeito do meio ambiente, a regulação da poluição atmosférica no país é feita em três etapas: qualidade ambiental e controle da poluição, controle de emissões por fontes fixas e controle de emissões por fontes móveis (Pereira Junior, 2007).

A estruturação do controle da qualidade de ar no Brasil iniciou-se a partir da década de 1970, impulsionada pelas discussões da Conferência de Estocolmo em 1972, resultando-se na criação da Secretaria Especial de Meio Ambiente (SEMA) em 1973. A criação do órgão visou subsidiar a realização de estudos sobre os ecossistemas brasileiros, assim como elaborar parâmetros para usos racionais dos recursos naturais do país, de modo que fossem compatibilizados o progresso tecnológico, o desenvolvimento e a preservação do meio ambiente (Silveira, 2015).

O Decreto-Lei nº 1.413, de 14 de agosto de 1975, o qual dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais regulamentou a qualidade do meio ambiente, relacionando-a à poluição do ar, águas e solo. Além disso, em 1980, o Decreto-Lei 1.413/1975 foi complementado pela Lei nº 6.803 de 02 de julho de 1980, a qual dispõe sobre diretrizes básicas para o zoneamento industrial nas áreas críticas de poluição e dá outras providências. Ambas as legislações tiveram como referência os graves problemas decorrentes da poluição atmosférica das regiões altamente industrializadas do país, como a região de Cubatão, em São Paulo (Pereira Junior, 2007).

Em avanço às pautas ambientais, em 1981 foi promulgada a Lei nº 6.938, a qual instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente e o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA). Além disso, ficou instituída a obrigatoriedade do licenciamento ambiental para atividades potencialmente poluidoras, implementando, desse modo, o controle da poluição atmosférica como um de seus principais objetivos. Ademais, também foi previsto no projeto da Política Nacional do Meio Ambiente a criação de um conselho capaz de reunir as partes interessadas

a respeito da expansão da temática ambiental, sendo este conselho materializado como o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). A legislação nacional projetava-se de modo que fosse estabelecida uma estrutura política capaz de fornecer condições para a instituição de uma legislação específica sobre meio ambiente no país (Brasil, 1981; Silveira, 2015).

A Constituição de 1988, incorporando muito da Lei nº 6.938/81, estabeleceu como competência comum da União, Estados, Distrito Federal e Municípios o dever de proteger o meio ambiente e o combate à poluição. Além disso, o meio ambiente passou a ser tratado como um direito coletivo, relacionando a sua preservação como um dever do poder público e da coletividade. Os infratores que realizarem condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente estarão sujeitos a sanções penais e administrativas. Posteriormente, a Lei de Crimes Ambientais, Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, consolidou todas as sanções e infrações previstas na legislação ambiental federal (Brasil, 1988; Pereira Junior, 2007).

Em 1986, o país seguiu em uma importante etapa para a regulação do controle da poluição atmosférica por meio da Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986, a qual estabeleceu um programa de controle da poluição veicular, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), o qual estabeleceu limites máximos de emissão para os veículos novos comercializados no Brasil (Brasil, 1986). Em sequência, considerando-se a necessidade de que fossem fixados parâmetros para emissão de poluentes pelas fontes fixas, criou-se o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR) por meio da resolução CONAMA nº 05, de 15 de junho de 1989 (Brasil, 1989).

Posteriormente, a Resolução CONAMA nº 03 de 1990 complementou o PRONAR, ao estabelecer limites para a concentração de poluentes como MP_{10} , $MP_{2,5}$, SO_2 , CO , O_3 e NO_2 . Esses limites embasaram-se nas normas da Organização Mundial da Saúde, as quais consideram limites de concentração compatíveis com o bem-estar e saúde dos seres humanos. Em adição, também foram estabelecidos métodos de amostragem e análise dos poluentes (Brasil, 1990).

Ao longo dos anos 90 e do início dos anos 2000, houve muitas resoluções e leis reforçando as medidas estabelecidas anteriormente, e ampliando o escopo do monitoramento dos

poluentes. Pode-se destacar a atualização das metas do PROCONVE por meio das Resoluções CONAMA nº 8/1993, a qual estabeleceu limites máximos de emissões de poluentes para veículos pesados novos, as Resoluções CONAMA nº 16/1994 e CONAMA nº 27/1994, que atualizaram os prazos para cumprimento dos dispositivos da CONAMA nº 8/1993, e da Resolução CONAMA nº 315 de 2002, a qual dispôs sobre as etapas seguintes do PROCONVE. É importante destacar que devido à eficácia do PROCONVE, os veículos fabricados a partir de 1993 passaram a emitir um décimo dos poluentes dos veículos similares fabricados na década de 1980 (Pereira Júnior, 2007).

Os padrões de qualidade do ar foram revisados na Resolução CONAMA nº 491 de 2018, embasando-se nos valores estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde em 2005 (Brasil, 2018). E, mais recentemente, houve uma nova atualização, dessa vez com o estabelecimento de prazos para o cumprimento das metas progressivas de melhorias, bem como para atualização dos padrões de qualidade conforme revisto pela OMS em 2021, por meio da Resolução CONAMA nº 506/2024 (Brasil, 2024a).

3.3.2 *Padrões da Qualidade do Ar*

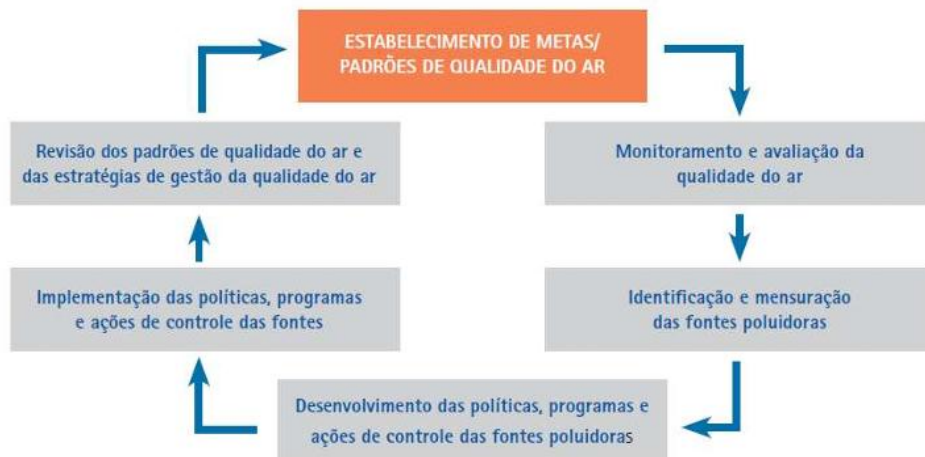
A diminuição da qualidade do ar é preocupante e é um fator de grande risco à saúde humana, em especial nos grandes centros urbanos, impactando principalmente idosos e crianças. Além disso, há o impacto da poluição atmosférica nos ecossistemas, uma vez que a deposição dos poluentes atmosféricos pode levar a danos irreparáveis às plantas, e também pode, consequentemente, levar à diminuição da produtividade agrícola. Não obstante, pode ocorrer também contaminação de recursos hídricos, biomas aquáticos e solos (Santana *et al.*, 2012). A qualidade do ar deriva-se, diretamente, do sistema de fontes emissoras estacionárias, tais como indústrias e queima de lixo, e fontes móveis, representadas pelos veículos automotores. O transporte, a diluição na atmosfera e a magnitude do lançamento dessas emissões definem o estado da qualidade do ar atmosférico de uma região (Lima *et al.*, 2012).

A OMS, órgão vinculado à Organização das Nações Unidas (ONU), dentre outras atividades, define parâmetros e diretrizes para planejamentos de políticas públicas de saúde. Relativo à poluição atmosférica, são publicadas recomendações (chamadas de *Guidelines*) quanto às concentrações máximas de poluentes em que se espera que não ocorram efeitos nocivos para

a saúde humana, com o objetivo de subsidiar a gestão ambiental de cada país na definição de seus próprios padrões de qualidade do ar (Santana *et al.*, 2012).

Dessa forma, a prevenção dos efeitos indesejados da poluição atmosférica consiste em identificar níveis seguros para que a saúde da população não seja comprometida. Esses níveis constituem a base para o estabelecimento dos padrões de qualidade do ar. Considerando-se a importância dos padrões como ferramenta que pode direcionar outros instrumentos da gestão de qualidade do ar, deve-se manter os padrões alinhados com a ciência sobre riscos e impactos da poluição atmosférica sobre a saúde humana e o meio ambiente, necessitando de atualizações constantes (Santana *et al.*, 2012). Esse modelo está exemplificado na Figura 4, a seguir.

Figura 4 - Estabelecimento e Avaliação dos Padrões de Qualidade do Ar como ferramenta de Gestão da Qualidade do Ar.



Fonte: Santana *et al.* (2012).

Os padrões de qualidade do ar foram estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 03/1990, como instrumentos de gestão ambiental no âmbito do PRONAR – Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar, instituído pela Resolução CONAMA nº 005/1989, visando atender parte dos objetivos da Política Nacional de Meio Ambiente, Lei 6.938/1981 (Lima *et al.*, 2012). Esses padrões eram classificados em:

- **Primários:** níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes para proteger a saúde da população.

- **Secundários:** concentrações que minimizam impactos adversos ao bem-estar, à fauna, à flora e ao meio ambiente em geral.

O PRONAR aplica esses padrões de forma diferenciada em três classes de uso do espaço:

1. **Classe I:** áreas de preservação ambiental, onde a qualidade do ar deve permanecer próxima ao nível natural.
2. **Classe II:** áreas com limite de deterioração regido pelo padrão secundário.
3. **Classe III:** áreas de desenvolvimento, com limite de deterioração conforme o padrão primário.

A Resolução CONAMA nº 03/1990 estabeleceu os valores de referência para poluentes como MP₁₀, NO₂, SO₂, CO, O₃, entre outros, além de especificar métodos de amostragem e análise, delegando ao INMETRO e ao IBAMA a normatização complementar. Métodos alternativos podiam ser utilizados, desde que aprovados pelo IBAMA (Santana *et al.*, 2012).

Por meio da Resolução CONAMA nº 491/2018, foram atualizados os padrões de qualidade que haviam sido estabelecidos em 1990, visando o alcance dos valores propostos pela OMS em 2005. Para tal, foram estabelecidos padrões intermediários com valores que deverão ser cumpridos em etapas até que o atingimento do padrão de qualidade do ar final (MMA, 2018), o qual utiliza valores definidos pela OMS em 2005, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Padrões de qualidade do ar conforme a resolução CONAMA nº 491/2018.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	ppm
Material Particulado - MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora	260	240	220	200	-
	Anual	60	50	45	40	-
Ozônio - O ₃	8 horas	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb	Anual	-	-	-	0,5	-

Fonte: Adaptado de Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (2018).

A Resolução CONAMA nº 506/2024 atualizou os padrões de qualidade do ar final para os valores definidos pela OMS em 2021, sendo que o padrão final estabelecido pela CONAMA nº 491/2018 passou a ser PI-4 e o padrão recomendado pela OMS em 2021 passou a ser PF, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Padrões de qualidade do ar conforme a resolução CONAMA nº 506/2024.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PF	
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	ppm
Material Particulado - MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual	40	35	30	20	15	-
Material Particulado - MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	15	-
	Anual	20	17	15	10	5	-
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	125	50	40	40	40	-
	Anual	40	30	20	20	20	-
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora	260	240	220	200	200	-
	Anual	60	50	45	40	10	-
Ozônio - O ₃	8 horas	140	130	120	100	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual	40	35	30	20	15	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	-	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	-	240	-
	Anual	-	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb	Anual	-	-	-	-	0,5	-

Fonte: Adaptado de Brasil (2024a).

Quanto às etapas intermediárias, foram então estabelecidos os prazos de vigência de cada fase: PI-1 até 31 de dezembro de 2024, PI-2 entrou em vigor em 1 de janeiro de 2025, PI-3 entrará em vigor em 1 de janeiro de 2033 e PI-4 entrará em vigor em 1 de janeiro de 2044. Já os padrões PF entrarão em vigor em data que será posteriormente definida em resolução do CONAMA após análise de viabilidade embasada pelos relatórios nacionais de monitoramento de qualidade do ar (Brasil, 2024a).

3.3.3 Monitoramento da Qualidade do Ar

Para a verificação do cumprimento dos padrões de qualidade do ar, assim como a divulgação das informações da qualidade do ar relativas à saúde, devem ser utilizados dados obtidos pelos métodos de medição da qualidade do ar de referência ou equivalentes, conforme indicado no Guia Técnico para o Monitoramento e a Avaliação da Qualidade do Ar, guia este a ser publicado pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima até 18 dezoito meses após a entrada em vigor da resolução CONAMA 506/2024 (MMA, 2024).

No dia 2 de maio de 2024 foi publicada a lei 14850/2024 que instituiu a nova Política Nacional da Qualidade do Ar, a qual propõe e estimula a adoção de tecnologias limpas com objetivos de promover a proteção à saúde e melhorar a qualidade do ar, assim como o adequado monitoramento da qualidade do ar e a redução progressiva das emissões e concentrações de poluentes atmosféricos. Como instrumentos da Política são considerados os limites máximos de emissão atmosférica, os padrões e o monitoramento da qualidade do ar, inventários de emissões atmosféricas, planos, programas e projetos setoriais de gestão de qualidade do ar e controle da poluição por fontes de emissão, e o Sistema Nacional de Gestão da Qualidade do Ar, o MonitorAr (Brasil, 2024b).

O Sistema Nacional de Gestão da Qualidade do Ar integra o Programa Nacional Ar Puro, cujo foco é manter a qualidade do ar. Por meio desse sistema, é possível monitorar e divulgar as informações em tempo real por meio de site e aplicativo gratuitos. Os dados da plataforma são provenientes de dados locais e integração com as demais estações de monitoramento de qualidade do ar no país (Brasil, 2021).

3.4 Poluição Atmosférica e a Pandemia de COVID-19

Em 2019, na cidade de Wuhan, na China, identificou-se uma nova variante de vírus da família dos coronavírus, grupo que inclui outras síndromes respiratórias tais como SARS-CoV (Síndrome Respiratória Aguda Grave) e MERS-CoV (Síndrome Respiratória do Oriente Médio). A nova variante ficou conhecida como doença coronavírus 2019 (SARS-CoV-2), ou COVID-19 sendo responsável por uma das maiores crises sanitárias de dimensões globais registradas (Lone; Ahmad, 2020). Diante da facilidade da transmissão do vírus, dada pelo contato e por meio de gotículas, a disseminação por toda a China foi extremamente eficiente, alcançando quase 2000 casos registrados em menos de um mês, seguindo-se rapidamente para os demais países do continente asiático, para a Europa, para os Estados Unidos e, então, para os demais continentes. Em janeiro de 2020, a Organização Mundial de Saúde decretou estado de emergência de saúde pública internacional, e em março, a situação de pandemia SARS-CoV-2, COVID-19 (Duarte *et al.*, 2021).

Com o intuito de diminuir a velocidade da evolução da pandemia e evitar o colapso nos sistemas de saúde, muitos países adotaram medidas como distanciamento social, proibindo a

realização de eventos com grande aglomeração de pessoas, fechamento de escolas e comércios considerados não essenciais, redução de viagens e do uso de transportes públicos e incentivo ao regime de trabalho em casa (*home office*) (Aquino *et al.*, 2020). Nos casos mais extremos, adotou-se o *lockdown*, regime de bloqueio comunitário limitando-se, por meio de intervenção de autoridades, grande parte do funcionamento das atividades comerciais, industriais e de transporte, a fim de que, com as restrições mais severas de interações interpessoais, fossem obtidos menores índices de transmissão da doença (Wilder-Smith & Freedman, 2020).

Dadas as medidas de contenção, a redução do tráfego de veículos foi expressiva, assim como a demanda por energia, uma vez que houve diminuição da produção em fábricas e, conseqüentemente, redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Esses eventos refletiram na qualidade do ar, potencializados nos grandes centros urbanos e demais regiões com grande urbanização (Duarte *et al.*, 2021).

Esse efeito foi observado por Liu, Wang e Zheng (2021), ao avaliar o impacto das medidas restritivas em 76 países entre janeiro e julho de 2020. De acordo com o estudo, os países que implementaram medidas mais restritivas tiveram reduções de até valores acima de 30% das emissões de poluentes atmosféricos no período avaliado.

Já o trabalho de Wu *et al.* (2020) investigou a relação entre exposição prolongada a $MP_{2,5}$ e a taxa de mortalidade de COVID-19 nos Estados Unidos. A partir da análise de dados de mais de 3000 localidades, os autores perceberam que um aumento de 1 mg/m^3 no nível médio do poluente correlaciona-se a um aumento de 8% na taxa de mortalidade por COVID-19.

Patra *et al.* (2021) expõe que há estudos relacionando as exposições prolongadas a poluentes atmosféricos e as mortalidades devido COVID-19, entretanto é necessário aprofundar mais na temática para compreender melhor a relação entre os fatores.

3.5 Tratamento Estatístico dos Dados

3.5.1 Estatística Descritiva

Conjuntos muito extensos de dados podem gerar dificuldades ao serem analisados e essa análise demanda uma quantidade de tempo considerável. Para auxiliar nesse tipo de necessidade, pode-se utilizar de ferramentas como a estatística descritiva. Por meio da média, mediana, moda, variância e desvio padrão, pode-se organizar, resumir e interpretar as informações de modo claro e objetivo.

A média aritmética resulta da divisão do resultado da soma de números de uma determinada lista pela quantidade de números somados. Essa é uma medida de tendência central, isto é, valores que, de algum modo, podem representar todo um grupo (Silva, 2025).

A mediana é uma medida obtida a partir do elemento central de um grupo de uma quantidade ímpar de elementos e esse é um valor tal que metade dos demais valores são menores que ele. Caso esse grupo tenha quantidade par de elementos, a mediana é obtida pela média aritmética entre os dois elementos centrais (Luiz, 2025). A moda também é uma medida de tendência central, sendo definida como o valor mais recorrente de um determinado grupo de valores observados (Oliveira, 2025).

O desvio padrão (DP) é uma medida de dispersão, isto é, verifica quão distantes uns dos outros os elementos de um determinado grupo podem estar, quanto maior, mais dispersos. Dentre as medidas de dispersão, a variância representa quão longe um valor pode estar do valor central desse grupo, e o desvio padrão é expresso pela raiz quadrada positiva da variância. De um modo geral, o desvio padrão pode identificar o “erro” em um conjunto de dados caso um desses valores fosse substituído pela média aritmética (Ribeiro, 2025). Pode-se calcular o DP pela Equação 1:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_A)^2}{n}} \quad (\text{Equação 1})$$

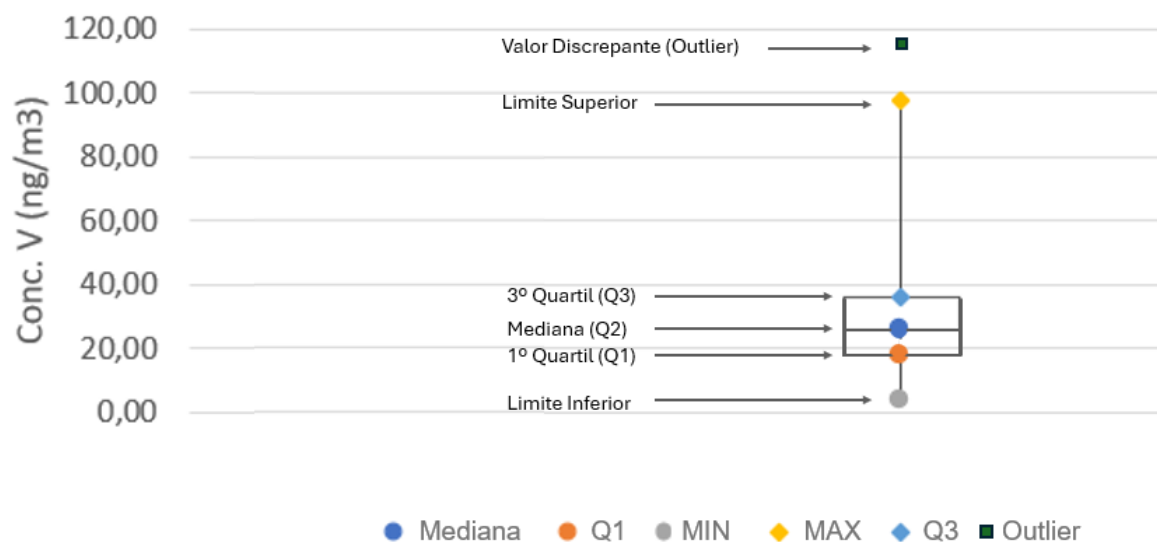
Sendo, DP: desvio-padrão, x_i : valor na posição i do conjunto de dados, M_A : média aritmética dos dados e n : quantidade de dados.

Leoni, Sampaio e Corrêa (2017) fizeram uso da estatística descritiva como método inicial em seu estudo a respeito da qualidade do ar no bairro da Gávea, no Rio de Janeiro, uma vez que foram analisadas médias horárias de 11 variáveis no período entre julho e outubro de 2011, totalizando mais de 2000 observações. Por meio das técnicas da estatística descritiva e multivariada foi possível elucidar a correlação entre as variáveis envolvidas.

3.5.2 *Boxplots*

Um *boxplot*, ou diagrama de caixa, é uma ferramenta gráfica que pode ser utilizada para representar conjuntos de dados distribuídos de acordo com algumas medidas, sendo elas: o valor mínimo, o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil e o valor máximo. Os quartis são limites dos agrupamentos dos dados de um conjunto em subgrupos menores. Também é possível observar os valores discrepantes desse conjunto de dados, chamados de *outliers*. Em um *boxplot*, a haste vertical é interpretada de baixo para cima, sendo a parte inferior a representação do mínimo e a superior representando o máximo. Já a caixa ao centro representa os quartis, sendo a extremidade superior o terceiro quartil e nas partes inferiores, o segundo quartil, ou mediana, e mais abaixo o primeiro quartil (OPENCADD, 2022), conforme mostrado na Figura 5 a seguir.

Figura 5 - Estrutura de um *boxplot* e seus componentes.



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir da visualização do *boxplot*, é possível compreender a natureza de um grupo de dados e a sua distribuição. Pode-se perceber também a existência de valores discrepantes do conjunto de dados diminuindo possibilidades de assumir limites não correspondentes à maior parte dos dados analisados. Soares (2021) constatou padrões das concentrações de poluentes atmosféricos de Belo Horizonte e oscilações de acordo com as estações sazonais por meio da análise de boxplots, aliado a outras técnicas estatísticas.

3.5.3 Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson expressa o grau de correlação entre diferentes variáveis métricas. Este coeficiente é uma medida adimensional, a qual pode assumir valores entre -1 e +1. Por meio da intensidade e módulo desses valores é possível compreender as relações entre as duas variáveis. Quanto mais próximo dos valores extremos, -1 ou +1, mais forte será a correlação entre essas medidas. Por outro lado, quanto mais próximo do centro desse intervalo, zero, mais fraca será a correlação linear entre essas variáveis (Gomes, 2024).

A correlação positiva, representada pelos valores maiores que zero, significa que as grandezas são diretamente proporcionais. Ao contrário disso, se houver uma correlação negativa, as medidas são inversamente proporcionais (Gomes, 2024).

3.5.4 Análises Multivariadas – PCA e HCA

A compreensão dos dados obtidos a partir de um grande conjunto de dados envolve, muitas vezes, a análise de uma quantidade de variáveis que podem trazer pouca informação em termos práticos, principalmente se avaliadas isoladamente. A seleção de quais variáveis são importantes pode ser feita ao reduzir-se as variáveis por critérios objetivos como pelo PCA, a Análise de Componentes Principais (do inglês *Principal Component Analysis*). Por meio desse método, Leoni, Sampaio e Corrêa (2017) puderam perceber correlações entre as variáveis meteorológicas e poluentes atmosféricos no Rio de Janeiro.

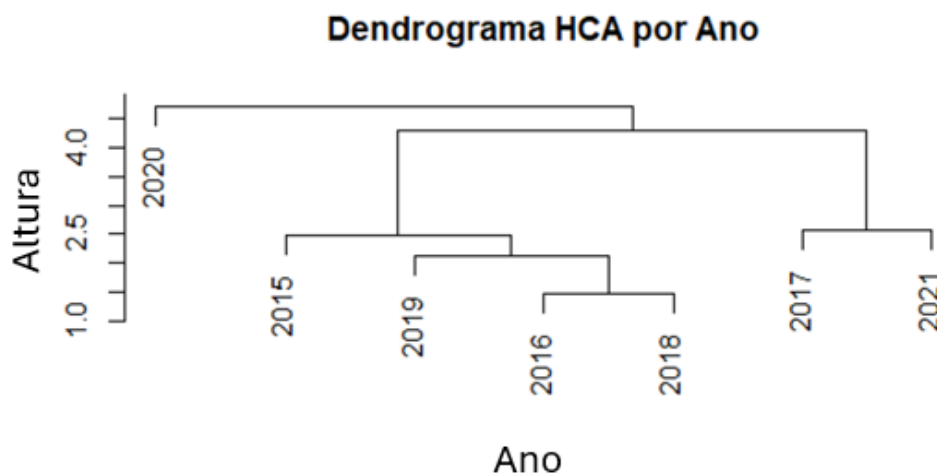
O PCA reduz as dimensões de grandes conjuntos de dados aos componentes que contêm a maior parte das informações originais daquele conjunto. Esta análise facilita a identificação de tendências, padrões ou valores discrepantes. Para a redução do conteúdo das informações

de grandes conjuntos, o PCA faz uso de combinações lineares das variáveis originais que contém a variância máxima em comparação com outras combinações lineares, desse modo capturando o máximo de informações do conjunto de dados original (IBM, 2023).

Outro modo de facilitar a compreensão desses dados é a construção de agrupamentos entre as variáveis disponíveis considerando-se suas similaridades. O HCA, método de Análise de Agrupamentos Hierárquicos (do inglês *Hierarchical Cluster Analysis*), faz uso dessa técnica representando as variáveis em um dendrograma (Leoni; Sampaio; Corrêa, 2017).

O dendrograma é um diagrama de árvore no qual são exibidos grupos formados por agrupamentos de observações, no qual o nível de similaridade entre esses elementos é medido ao longo do eixo vertical, quanto menor a distância neste eixo, maior a similaridade entre as variáveis. Já o eixo horizontal contém as diferentes observações analisadas no dendrograma (Minitab, 2025), conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6 –Representação de um dendrograma.



Fonte: Autoria própria (2025).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo e Coleta de Dados

A RMBH foi instituída em 1973 pela Lei Complementar nº 14 de 1973, sendo inicialmente constituída por 14 municípios: Belo Horizonte, Betim, Caeté, Contagem, Ibirité, Lagoa Santa, Nova Lima, Pedro Leopoldo, Raposos, Ribeirão das Neves, Rio Acima, Sabará, Santa

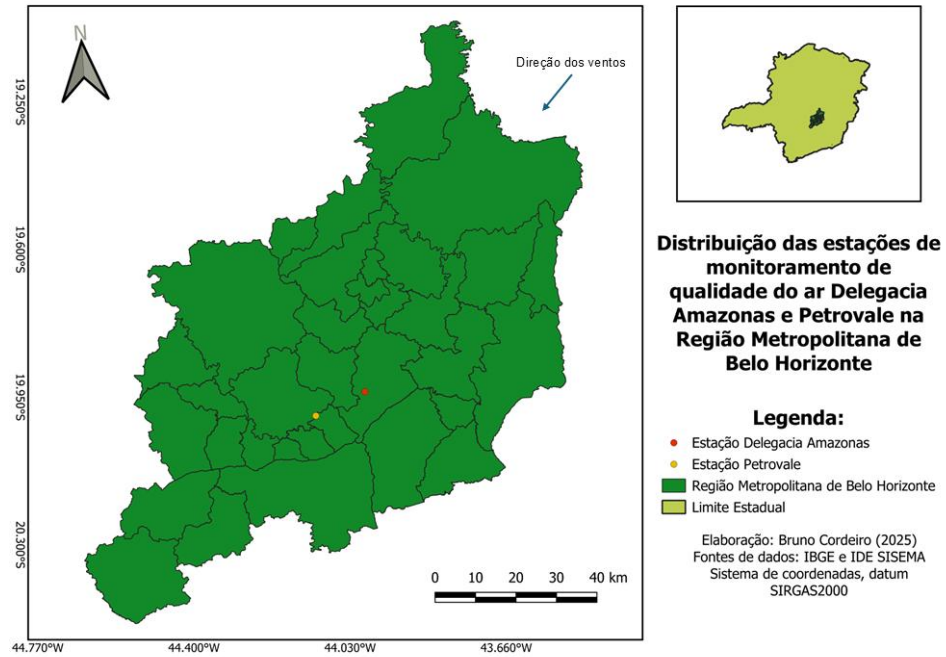
Luzia e Vespasiano (Brasil, 1973). Atualmente, a RMBH é composta por 34 municípios e é a terceira maior região metropolitana do país considerando-se sua população (Tonucci *et al.*, 2023).

Para este estudo, foram utilizados dados de qualidade do ar obtidos de estações automáticas de qualidade do ar do estado de Minas Gerais. Os dados necessários foram disponibilizados pelo Núcleo de Monitoramento do Ar e Emissões da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (NQA/SEMAD), referentes a duas estações de monitoramento da qualidade do ar na RMBH, coletados entre 2009 e 2023.

Os dados brutos para este estudo, obtidos em formato de 24 planilhas fornecidas pelo NQA/SEMAD, consistem em registros horários dos níveis de concentração de poluentes e dados atmosféricos da região de abrangência da estação em um determinado ano. Para o atual estudo, foram priorizadas informações meteorológicas e relativas à concentração de MP₁₀ abrangendo o período de 2009 a 2023 para a Estação Petrovale e de 2015 a 2021 para a Estação Delegacia Amazonas. As informações contidas nas planilhas compreendem dados registrados a cada hora para cada parâmetro, seja concentração de poluente, ou dado meteorológico, coletados entre 00h30min do primeiro dia do ano até às 23h30min do último dia desse mesmo ano.

Assim, as estações selecionadas estão representadas na Figura 7.

Figura 7 –Localização das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

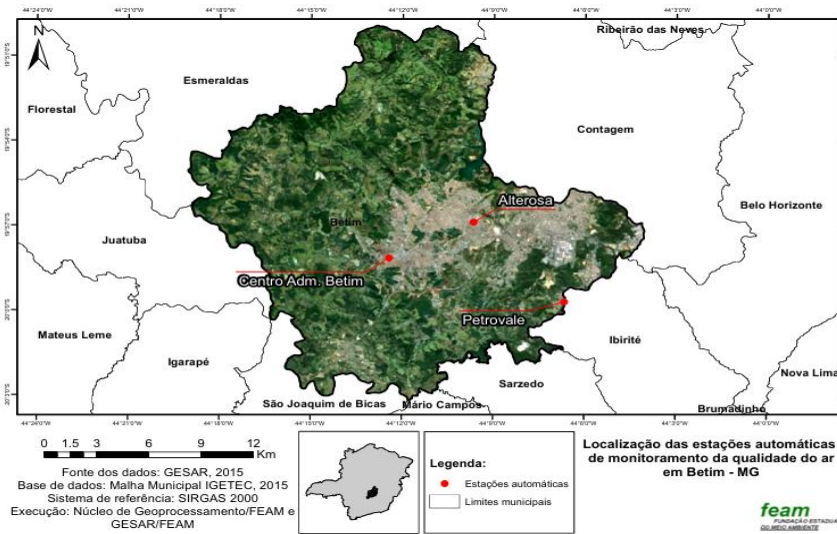


Fonte: Autoria própria (2025).

As estações foram selecionadas avaliando-se alguns critérios específicos:

- Estação Petrovale: Localizada no bairro Petrovale (Betim), conforme indicado na Figura 8. Sua seleção justifica-se pela proximidade a polos industriais e vias de alto fluxo veicular, permitindo-se avaliar a influência dessas fontes nas concentrações de material particulado.

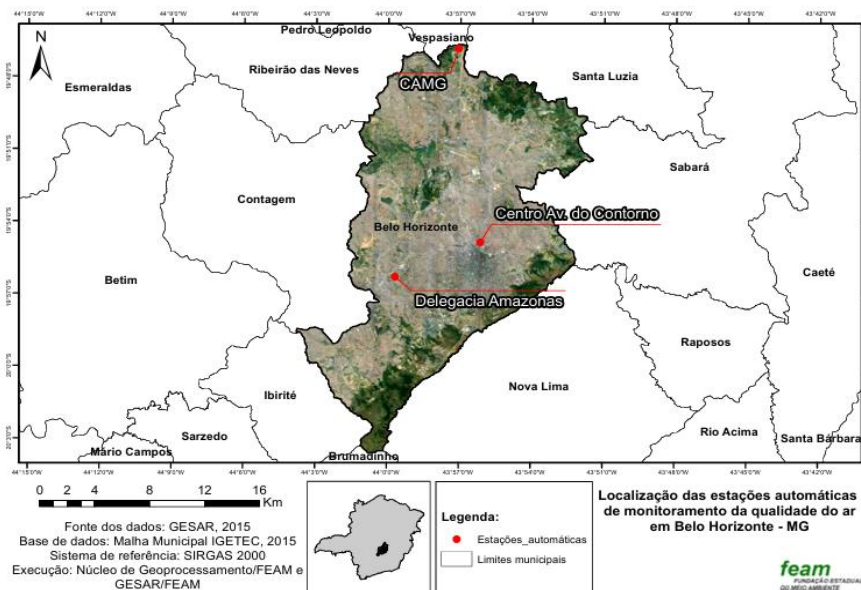
Figura 8 – Localização das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar em Betim - MG.



Fonte: FEAM (2024).

- Estação Delegacia Amazonas: Situada na Avenida Amazonas (bairro Gameleira, Belo Horizonte), conforme apresentado na Figura 9. Sua escolha decorre da localização em área central de elevada densidade populacional e tráfego veicular intenso, proporcionando um contraste relevante em relação ao perfil industrial da Estação Petrovale.

Figura 9 – Localização das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar em Belo Horizonte - MG.



Fonte: FEAM (2024).

Ambas as estações foram estrategicamente selecionadas para permitir uma avaliação abrangente e comparativa dos fatores que influenciam as oscilações de material particulado (MP₁₀) ao longo de um período superior a 7 anos, cobrindo tanto áreas urbanas densamente povoadas quanto regiões sob influência de atividades industriais.

4.2 Análises Estatísticas e Tratamento de Dados

Os dados brutos passaram por uma etapa inicial de validação para identificação de lacunas, duplicidades e registros anômalos, garantindo a integridade da base. Para organização e acesso facilitado, os dados foram consolidados em uma planilha única, estruturada em abas distintas por estação de monitoramento e ano, com síntese das informações relevantes para a pesquisa.

As médias diárias de MP₁₀ foram calculadas para viabilizar a construção de gráficos de dispersão, permitindo-se a avaliação da distribuição temporal das concentrações ao longo dos anos. Na etapa de tratamento, *outliers* foram identificados por meio de gráficos *boxplot*, com investigação das possíveis causas de sua ocorrência, tais como eventos pontuais de emissão ou falhas operacionais. A análise estatística incluiu:

- **Estatística descritiva:** cálculo de média aritmética, mediana, moda, DP, valores máximos e mínimos, considerando duas escalas temporais: conjunto total de dados por estação e dados anuais;
- **Representação gráfica:** elaboração de *boxplots* (para comparação de distribuição sazonal), gráficos de dispersão (para avaliação temporal das variações);
- **Análises multivariadas:** PCA e HCA, para avaliação de possíveis correlações entre as variáveis. Para o HCA foi utilizado o método de ligação *ward.D2*, o qual diminui as variâncias nos agrupamentos e utiliza distância euclidiana ao quadrado como forma de definir melhor as fronteiras dos *clusters*;

Para o PCA, foi utilizada a função *prcom()* com padronização inicial das variáveis utilizando a opção *scale. = TRUE* de modo a garantir que as variáveis tivessem importâncias iguais na

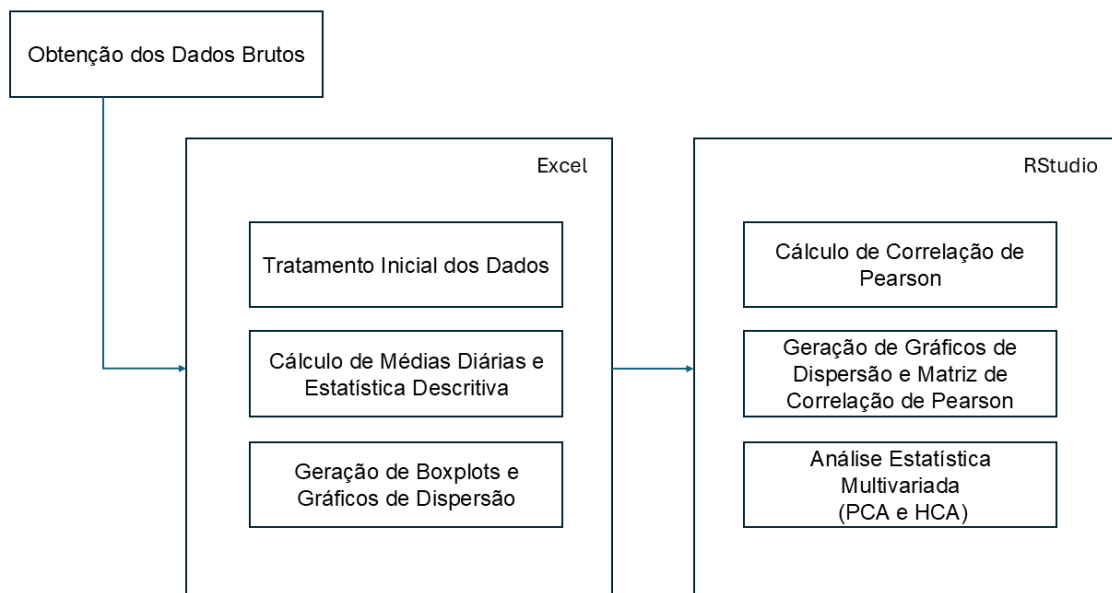
definição dos eixos principais, independente das unidades ou escalas. A visualização dos resultados foi feita a partir da função *fviz_pca_biplot()*.

Para o HCA, utilizou-se uma matriz de distâncias euclidianas por meio da função *dist()* calculada a partir dos dados normalizados. Para a análise foi utilizada a função *hclust()*, considerando-se para o agrupamento anual as médias anuais das variáveis, e para as variáveis a matriz transposta dos dados padronizados.

- **Análise de correlação de Pearson:** avaliação da relação entre as concentrações de MP_{10} e fatores externos e variáveis meteorológicas, como precipitação, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar.

Todo o processamento e análises foram realizados com auxílio dos *softwares* **RStudio** versão 2025.05.1 Build 513 (para procedimentos estatísticos avançados), linguagem **R for Windows** versão 4.5 e **Microsoft Excel** versão Microsoft Office 365 (para organização inicial, cálculos básicos, geração de gráficos e *boxplots*) conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma da metodologia do tratamento de dados deste trabalho.



Fonte: Autoria própria (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estatística Descritiva

Esta seção apresenta a análise estatística descritiva dos dados de monitoramento da qualidade do ar nas estações Delegacia Amazonas e Petrovale, situadas na RMBH. Na Tabela 3 são apresentadas as medidas síntese referentes ao conjunto completo de dados, previamente selecionado, relativos à Delegacia Amazonas, compreendendo o período dos anos de 2015 a 2021. Já na Tabela 4 são apresentadas as medidas para a estação Petrovale, compreendendo o período referente aos anos de 2009 a 2023.

Tabela 3 – Estatística descritiva da estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG.

Ano	Média ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desvio Padrão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Moda ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2015	31	18	1	195	26	27
2016	27	19	1	201	23	17
2017	22	16	1	264	19	17
2018	22	15	1	157	18	17
2019	21	15	1	144	17	11
2020	17	12	1	131	15	9
2021	24	15	1	98	20	17

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 4 – Estatística descritiva da estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG.

Ano	Média ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desvio Padrão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Moda ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2009	22	17	0	155	19	0
2010	32	27	0	555	25	11
2011	36	32	0	376	27	15
2012	31	26	0	239	24	15
2013	34	26	0	338	28	18
2014	33	28	0	745	27	0
2015	31	21	0	236	27	13
2016	29	20	2	248	25	19
2017	30	20	4	330	24	18
2018	26	16	3	134	22	21
2019	25	24	0	631	19	11
2020	17	15	3	279	13	9
2021	20	21	3	450	12	10
2022	18	14	0	251	14	9
2023	36	34	2	336	24	11

Fonte: Autoria própria (2025).

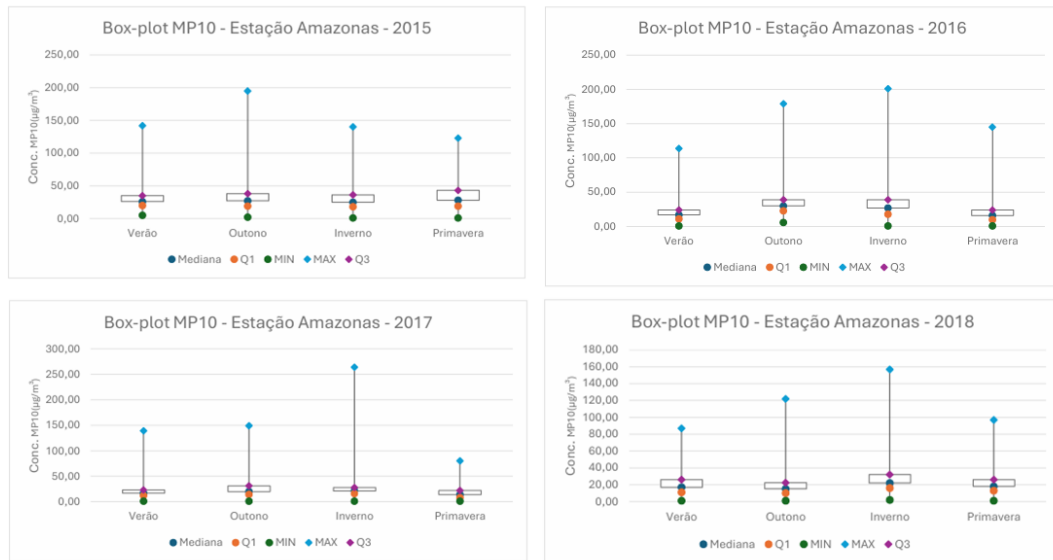
Pode-se perceber, que a Estação Petrovale apresenta médias, medianas, modas e máximos mais elevados de 2015 a 2019 das concentrações de MP_{10} comparada à Estação Delegacia Amazonas. Em 2020 e 2021, no entanto, as concentrações médias, medianas e modas na Estação Petrovale foram levemente mais baixas que na Estação Delegacia Amazonas. Porém, dados os valores de DP, os valores médios não são considerados estatisticamente diferentes. Observa-se também que ambas as estações apresentam valores consideráveis quanto ao desvio padrão, principalmente a Petrovale, demonstrando uma grande dispersão dos dados, fato justificado pela oscilação da concentração dos materiais particulados ao longo do dia, bem como influenciado pelas condições climáticas que variam significativamente nas diferentes estações do ano.

É importante adicionar que os valores máximos de concentrações de MP_{10} para ambas as estações de monitoramento excederam os valores estabelecidos de média anual pela CONAMA nº 03/1990 que eram de até $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e na maioria dos casos também o valor diário de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ considerando os dados até 2018. De 2019 a 2024 passou a vigorar os valores estabelecidos pela CONAMA 491/2018 de até $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na média anual e de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de média diária, ambos para o padrão intermediário I (PI-I). Entretanto, também é válido ressaltar que as médias diárias conseguiram ficar abaixo dos valores definidos.

Pode-se notar que, em geral, as médias de concentrações foram diminuindo ao longo dos anos, tendo decréscimos entre os anos de 2016 e 2018. Esse decréscimo coincide com o prazo final para adequação das emissões estabelecido pela deliberação normativa COPAM nº 187/2013 (Minas Gerais, 2013).

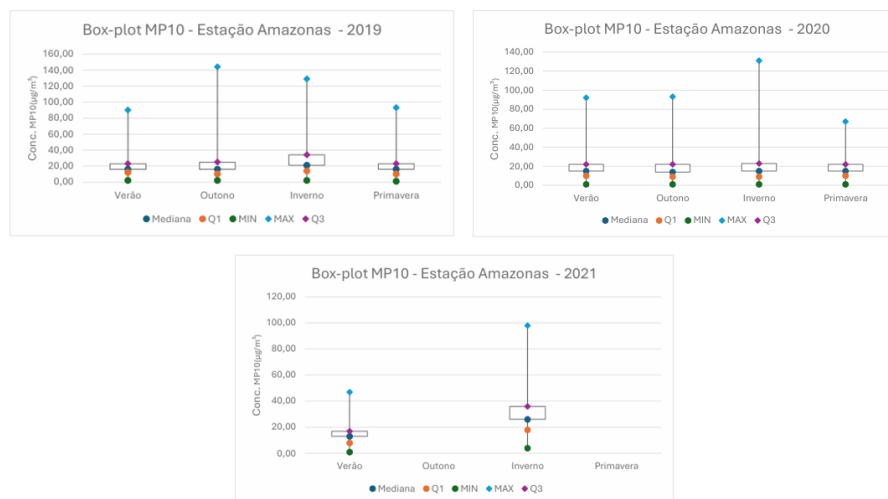
Complementando as análises, nas Figuras 11 a 16 são apresentados os *boxplots* contendo os dados distribuídos por estação de monitoramento, ano e estação do ano.

Figura 11 – *Boxplots* contendo a concentração de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, por estação do ano, situada em Belo Horizonte/MG, entre os anos de 2015 e 2018.



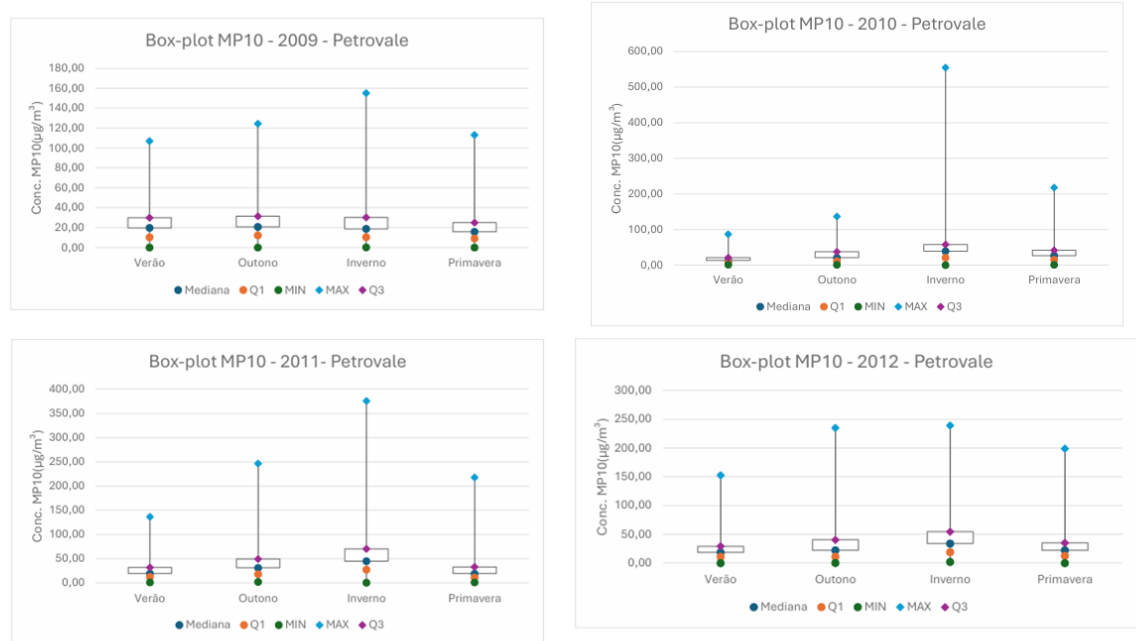
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 12 – *Boxplots* contendo a concentração de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, por estação do ano, situada em Belo Horizonte/MG, entre os anos de 2019 e 2021.



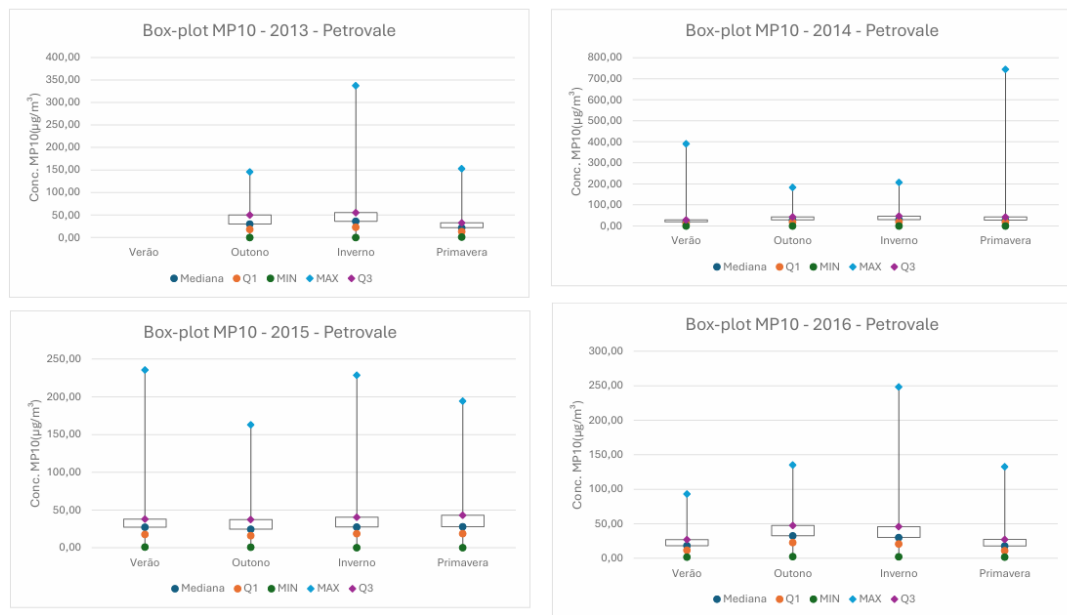
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 13 – *Boxplots* contendo a concentração de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, por estação do ano, situada em Betim/MG, entre os anos de 2009 e 2012.



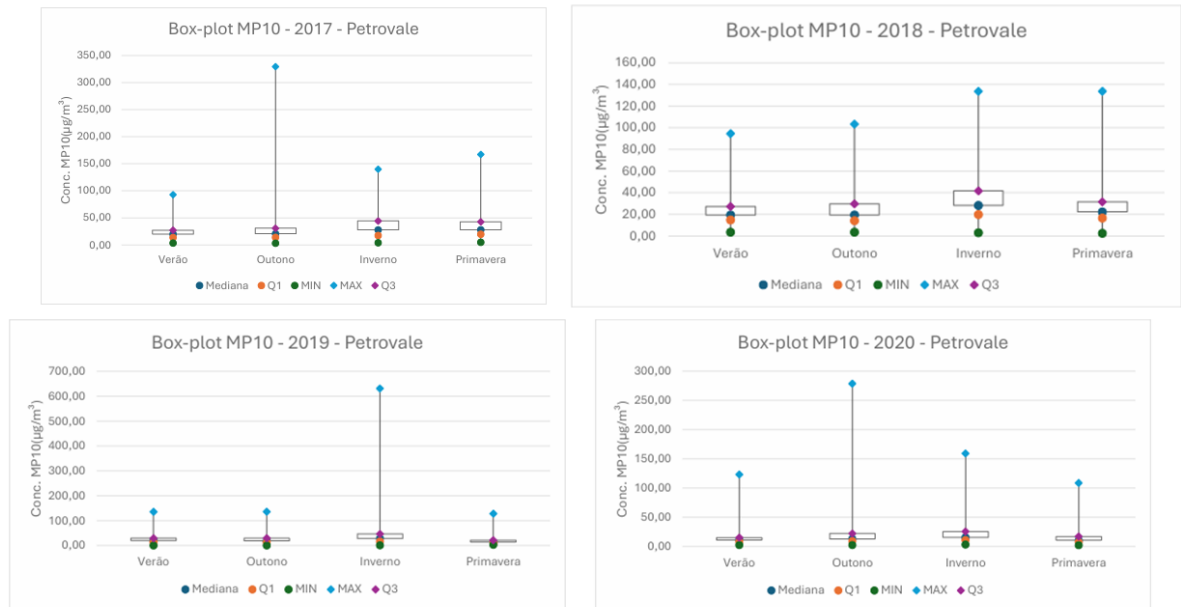
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 14 – *Boxplots* contendo a concentração de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, por estação do ano, situada em Betim/MG, entre os anos de 2013 e 2016.



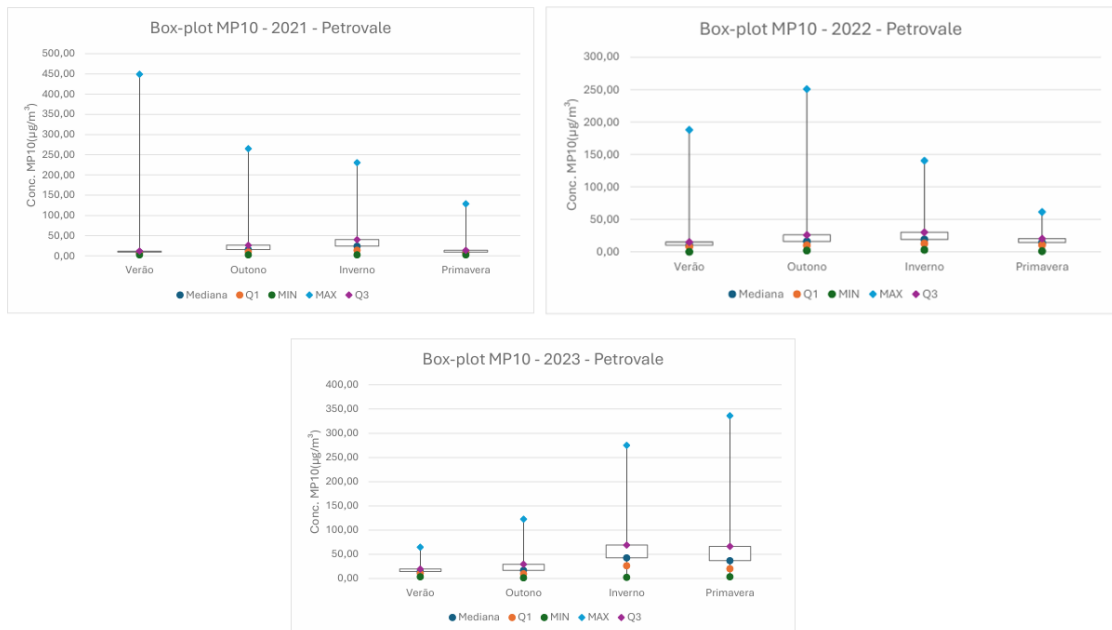
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 15 – *Boxplots* contendo a concentração de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, por estação do ano, situada em Betim/MG, entre os anos de 2017 e 2020.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 16 – *Boxplots* contendo a concentração de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, por estação do ano, situada em Betim/MG, entre os anos de 2021 e 2023.



Fonte: Autoria própria (2025).

No ano de 2021 não houve aquisição de dados de monitoramento em todos os meses do ano, desse modo alguns dos *boxplots* apresentados não tiveram dados suficientes para a compilação dos dados. De todo modo, ao observar os dados apresentados, levando-se em consideração questões sazonais, nota-se que, geralmente, no inverno a concentração dos poluentes é acentuada em quase todos os anos, isto é mais facilmente observado nos dados da Estação Petrovale. Além disso, foi mais frequente a observação dos valores máximos de concentração de MP_{10} no inverno, o que se vê nos gráficos de *boxplot* como *outliers*. Uma vez que a concentração de poluentes é fortemente relacionada às condições meteorológicas, pode-se relacionar alguns parâmetros que favorecem esse acúmulo de poluentes em períodos nos quais há baixa umidade do ar, ventos fracos e ocorrência de inversão térmica. A inversão térmica ocorre quando a temperatura do ar aumenta com a altitude, no lugar de diminuir, e é formada uma camada de ar quente que retém os poluentes entre essas camadas de ar frio e ar quente (CETESB, 2025).

Considerando-se os dados anteriormente calculados relativos à mediana e moda para o conjunto de dados obtido e os *boxplots* elaborados, pode-se notar uma tendência com relação à concentração dos poluentes em valores menores que os valores permitidos pela legislação vigente. Para os *boxplots*, foram destacados também os valores máximos obtidos nas medições, entretanto achatando a parte central dos gráficos.

Por meio dos *boxplots* percebe-se, novamente, que a concentração de poluentes na estação Delegacia Amazonas apresenta valores menores que os apresentados na estação Petrovale. Pode-se inferir que a influência da área industrial é um fator relevante para essa percepção. Além disso, a direção preferencial dos ventos em Belo Horizonte e Betim é do sudeste para o oeste, corroborando para a concentração de MP_{10} em regiões mais à oeste.

As concentrações das partículas inaláveis na região da estação Delegacia Amazonas conseguem manter-se, na maior parte dos dados obtidos, abaixo do padrão intermediário estabelecido vigente no período analisado, como pode-se observar pelos quartis centrais dos gráficos. Por outro lado, na estação Petrovale é notável que há dificuldade de restringir-se os registros aos limites estabelecidos, principalmente nos períodos mais secos, representados pelo inverno.

Há alguns pontos de atenção ao se observar os valores máximos observados na estação Petrovale nos anos de 2014 e 2015. Pode-se supor que houve eventos atípicos que podem ter impactado a atmosfera ao longo deste período na região, como, por exemplo, a realização de obras para a Copa do Mundo de 2014, propiciando maior movimentação veicular e poeira oriunda das obras no período anterior ao evento.

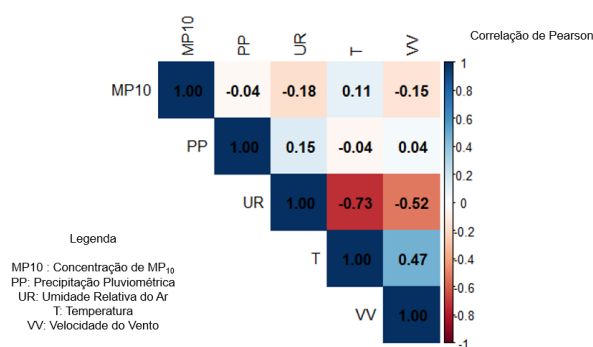
Além disso, no ano de 2019 houve um período de estiagem severo no país, levando ao aumento do nível de poluição durante o inverno na RMBH, notado principalmente na estação Petrovale.

Ademais, os impactos relativos às restrições da pandemia de COVID-19 também são perceptíveis quando se observa queda da média das concentrações nos anos de 2020 a 2022.

5.2 Análise da Correlação Linear

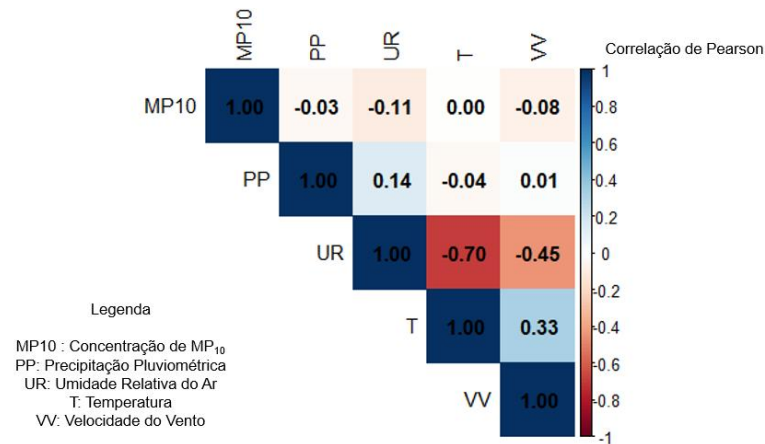
Esta seção apresenta a análise da correlação de Pearson referente aos dados de monitoramento da qualidade do ar nas estações Delegacia Amazonas e Petrovale e os parâmetros meteorológicos selecionados: temperatura, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica e velocidade do vento. Na Figura 17 são apresentados os valores relativos à Delegacia Amazonas compreendendo a relação entre os parâmetros meteorológicos e a concentração de material particulado inalável. Já na Figura 18 encontram-se os valores para a estação Petrovale.

Figura 17 – Matriz de correlação de Pearson entre MP_{10} e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 18 – Matriz de correlação de Pearson entre MP₁₀ e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG.



Fonte: Autoria própria (2025).

Em ambas as matrizes, houve correlações fracas entre as variáveis meteorológicas e o MP₁₀. De todo modo, há uma leve correlação negativa entre o poluente e a precipitação pluviométrica, a umidade relativa e a velocidade do vento, o que significa que se alguma dessas variáveis aumenta, a concentração do material particulado tende a diminuir. A relação inversa corresponde ao comportamento esperado das partículas para os eventos climáticos. Por meio da análise, também é possível dizer que há pouca relação entre a temperatura e a concentração de MP₁₀, sendo também condizente ao que foi observado por Santos, Reboita e Carvalho (2018) em seu estudo sobre concentrações de MP₁₀ e O₃ e sua relação com as variáveis atmosféricas no estado de São Paulo. Os valores mais neutros obtidos para as variáveis de correlação neste estudo podem estar relacionados à natureza dos dados, os quais apresentam lacunas para algumas das medidas avaliadas. Além disso, podem haver correlações não lineares entre as variáveis observadas não identificadas pelos métodos utilizados.

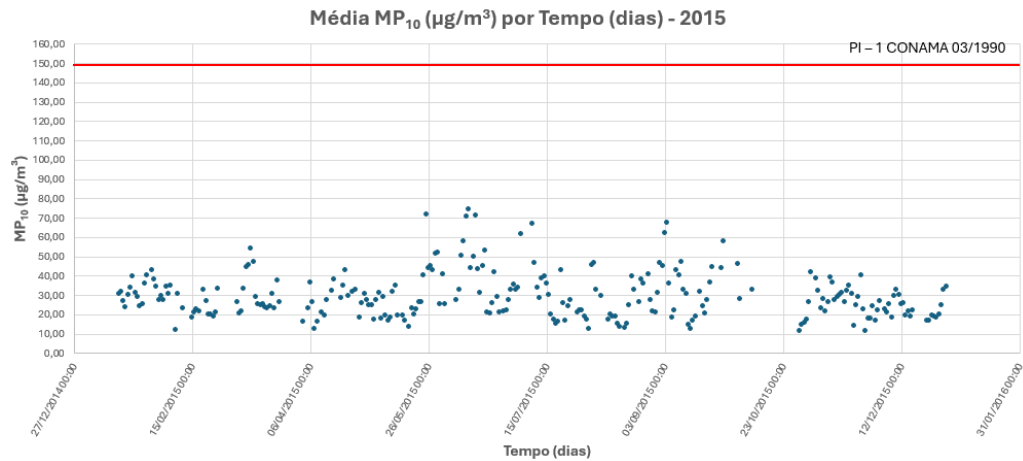
5.3 Gráficos de Dispersão

5.3.1 Período Temporal

Nas Figuras 19 a 24 são apresentados os gráficos de dispersão que mostram as concentrações médias de MP₁₀ ao longo dos anos de 2015 a 2020 para a estação Delegacia Amazonas. E

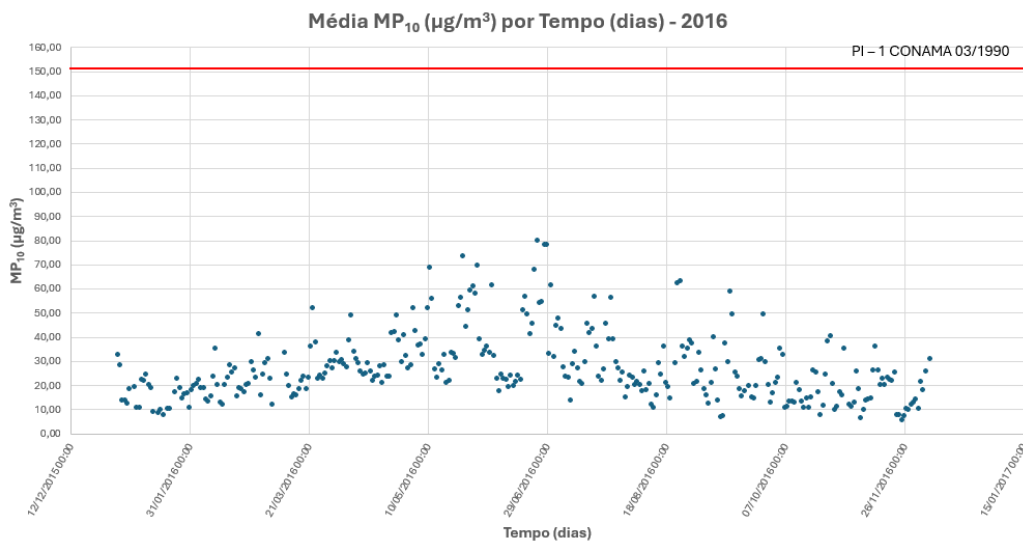
nas Figuras 25 a 39 são apresentados os gráficos de dispersão para as concentrações médias de MP_{10} na estação Petrovale no período de 2009 a 2023.

Figura 19 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2015.



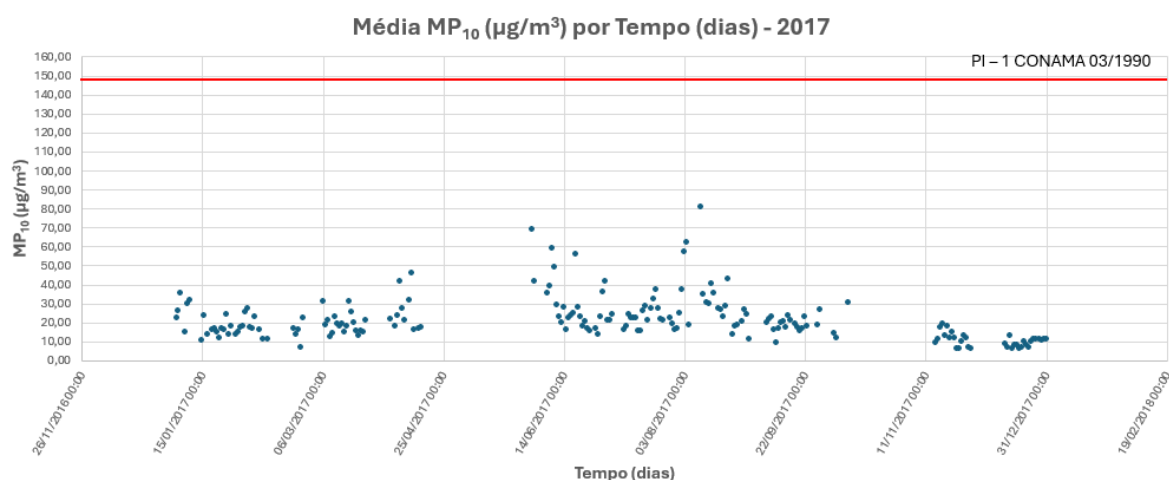
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 20 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2016.



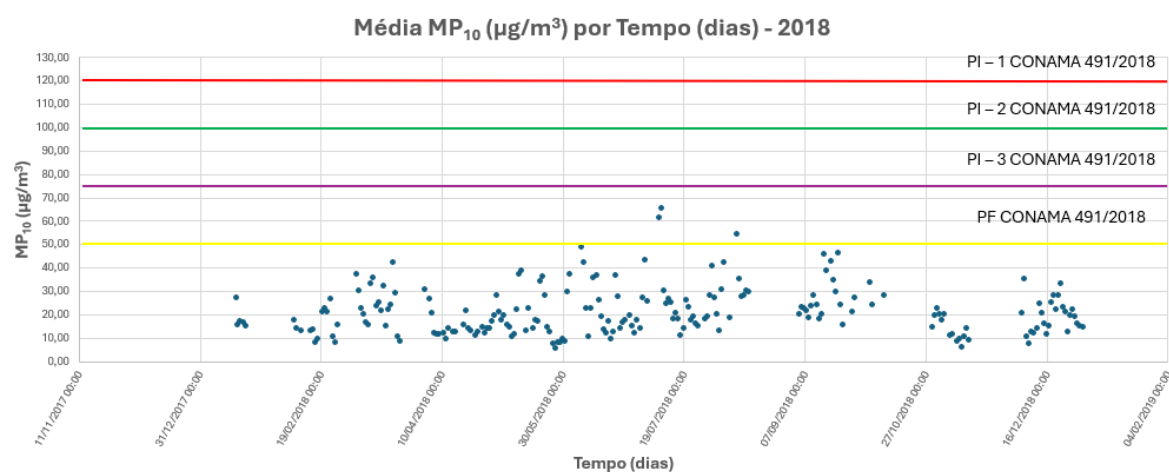
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 21 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2017.



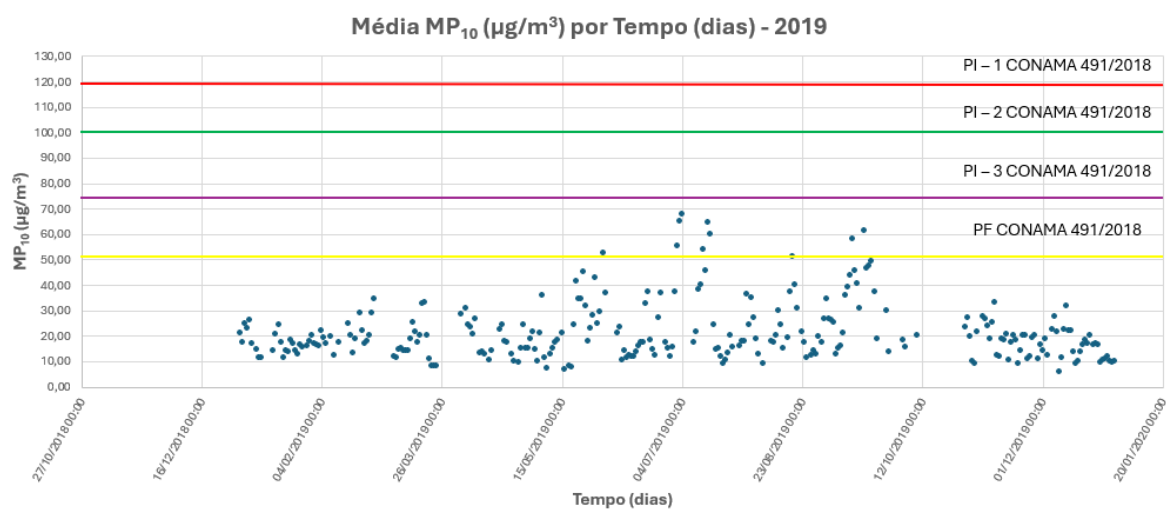
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 22 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2018.



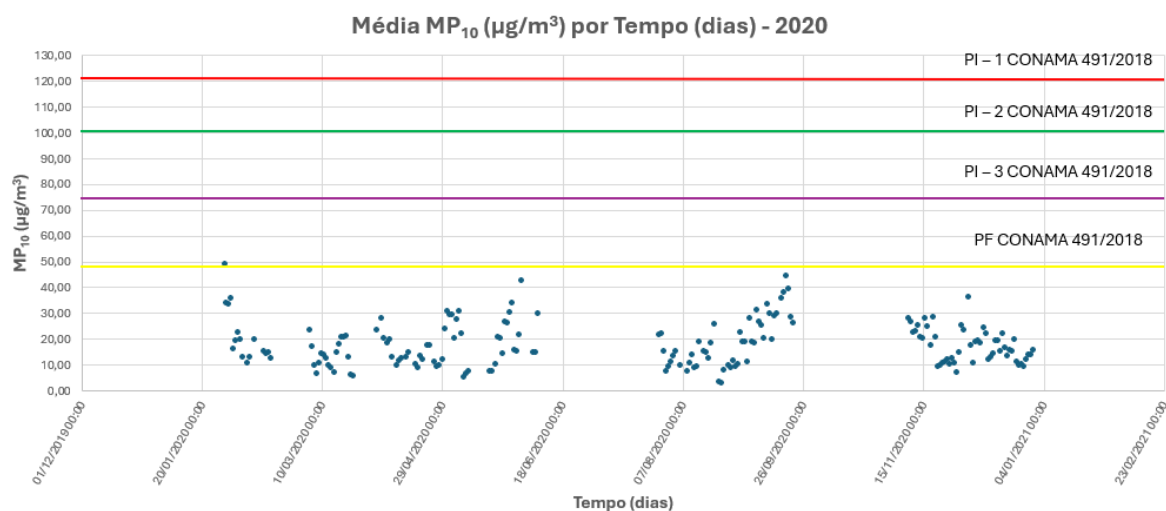
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 23 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2019.



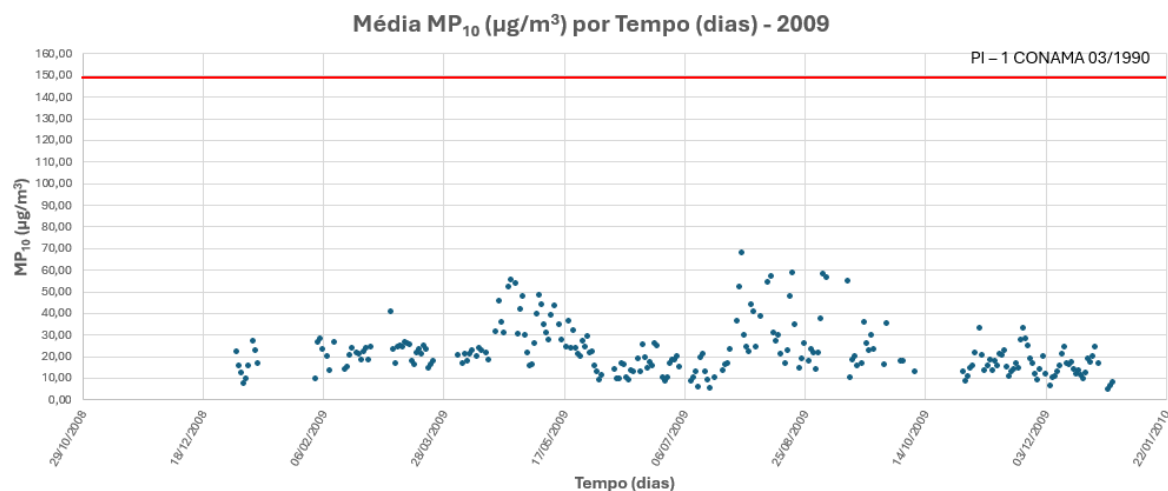
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 24 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG no ano de 2020.



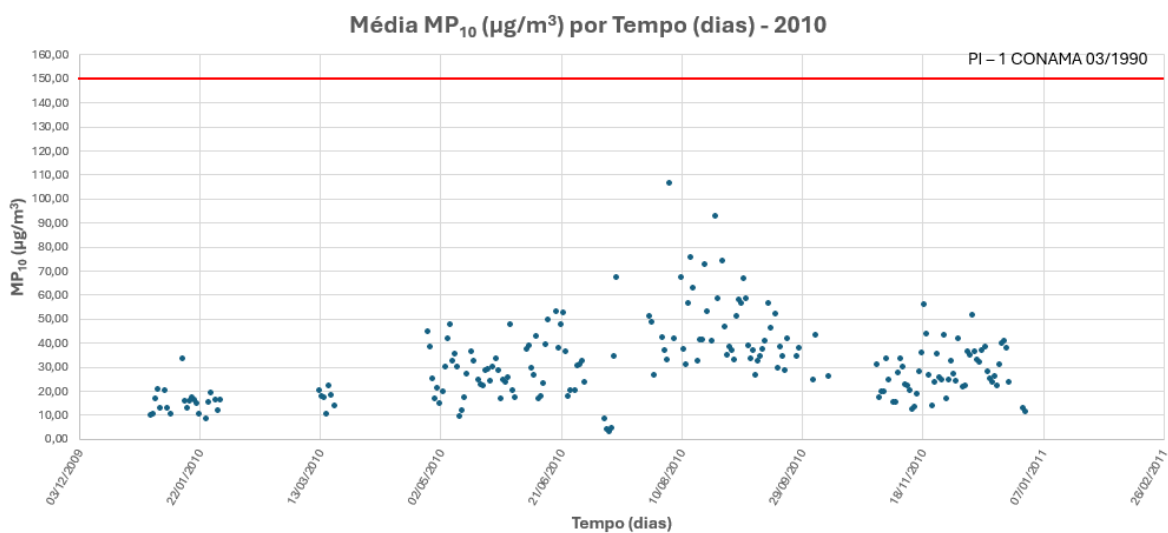
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 25 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2009.



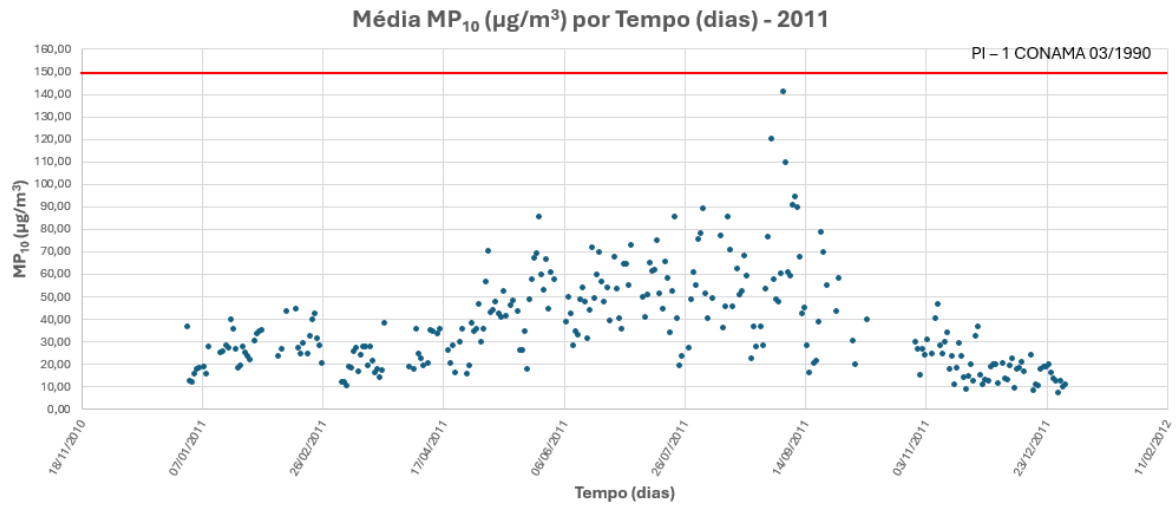
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 26 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2010.



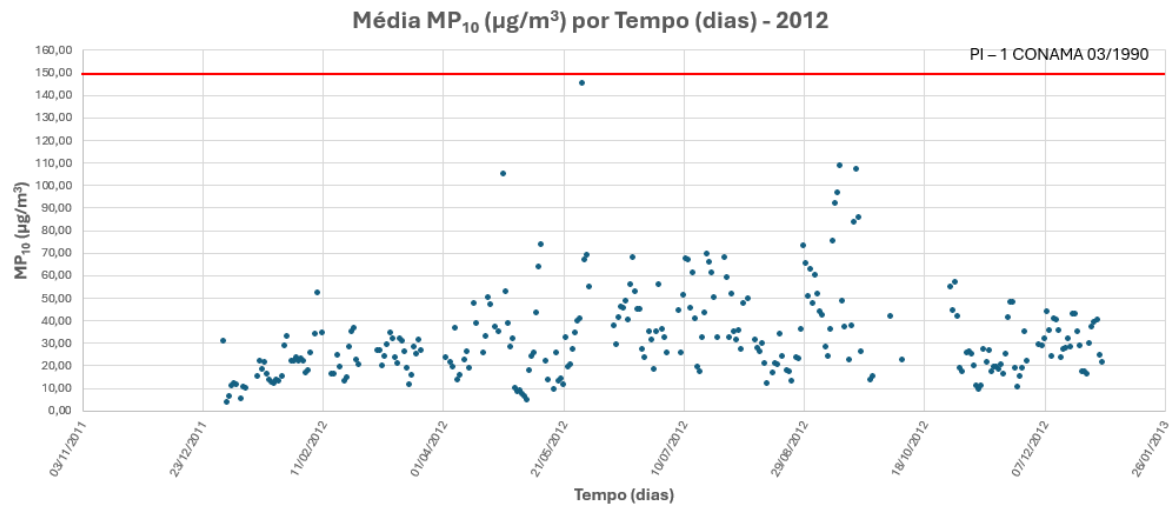
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 27 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2011.



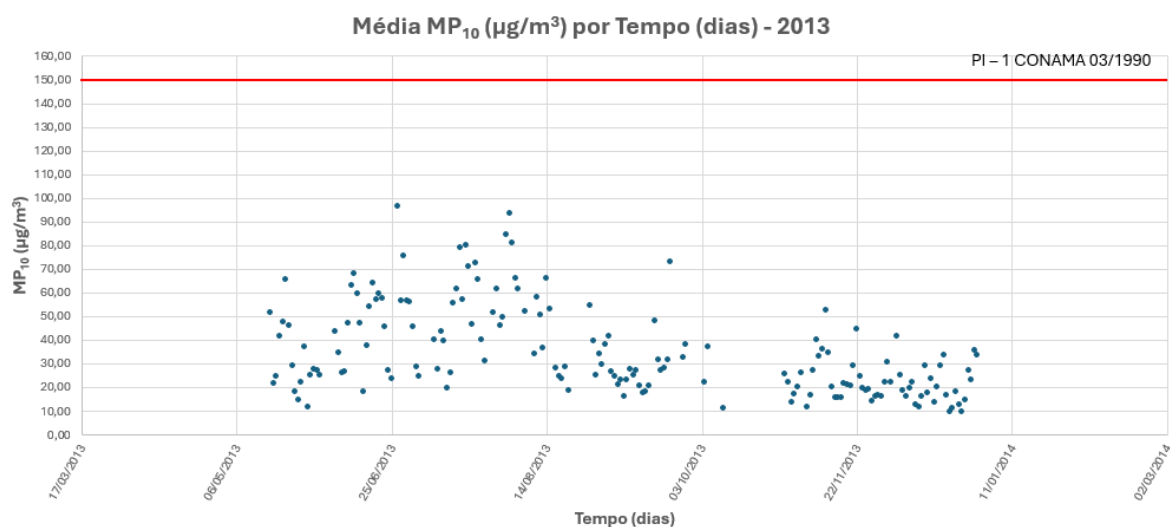
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 28 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2012.



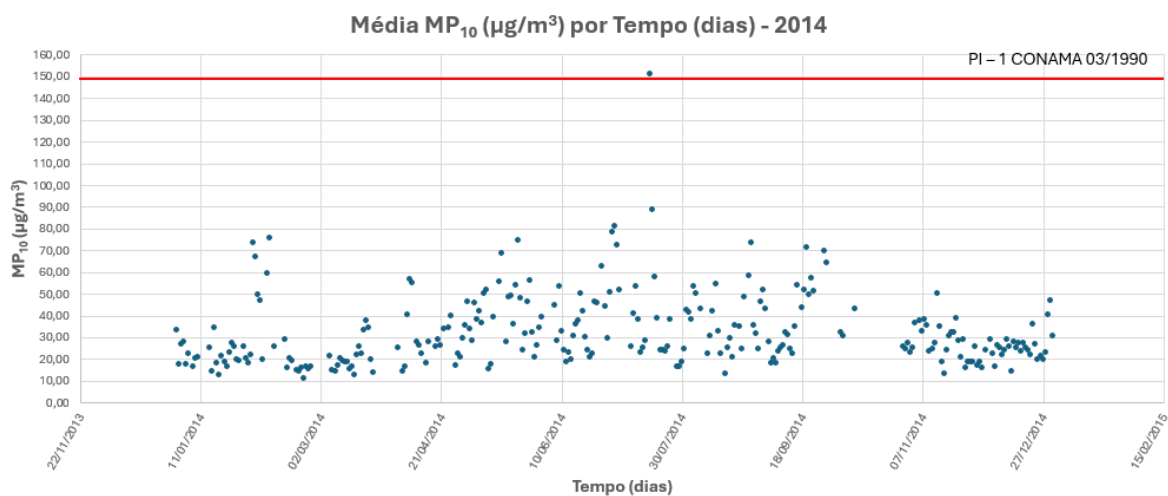
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 29 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2013.



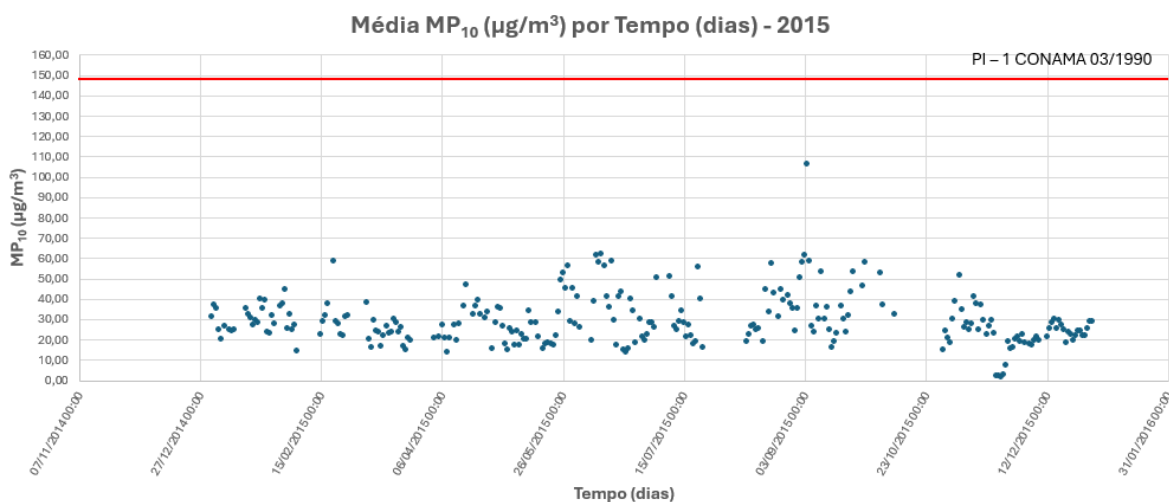
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 30 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2014.



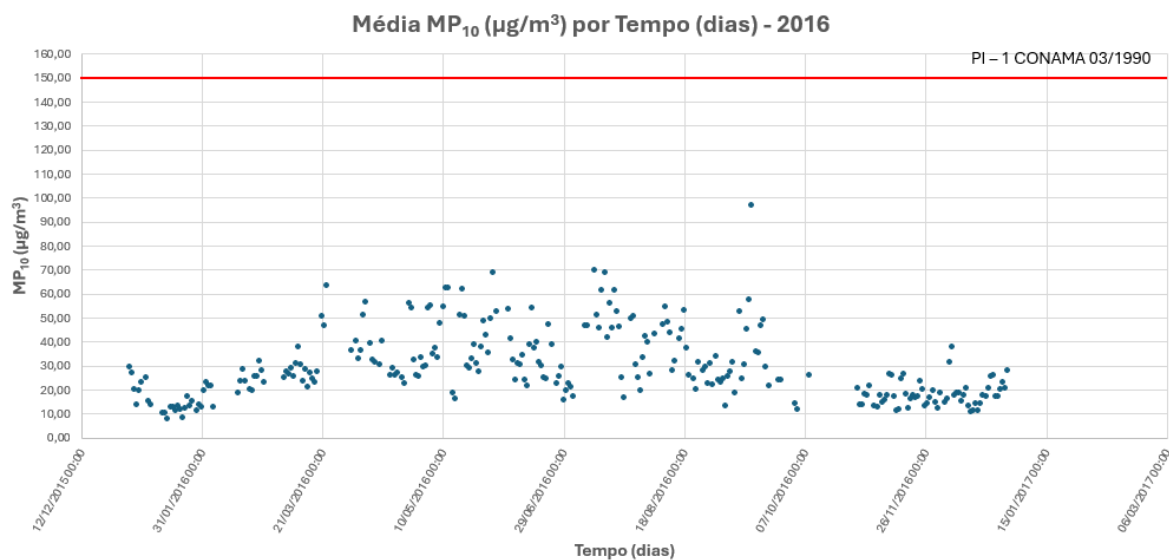
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 31 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2015.



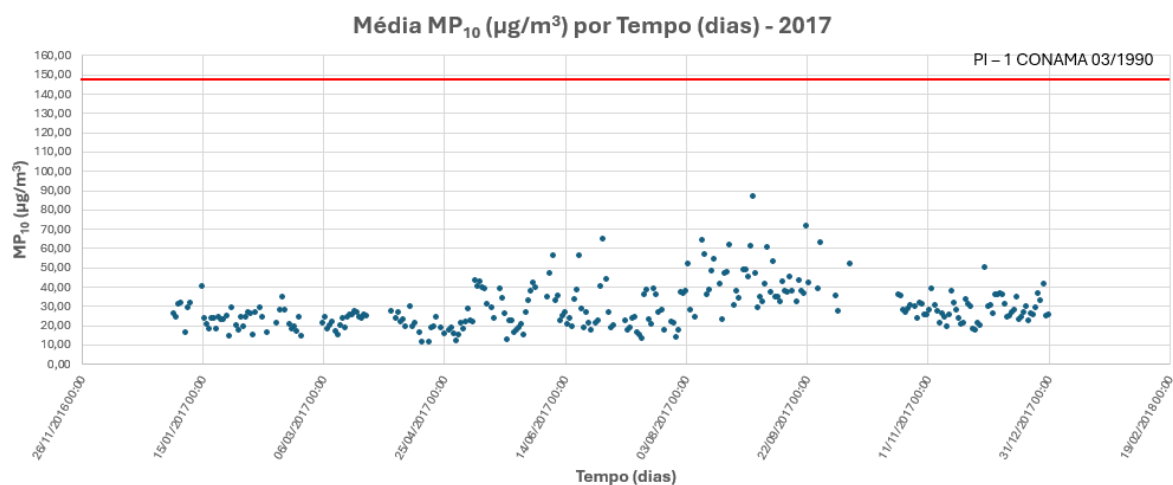
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 32 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2016.



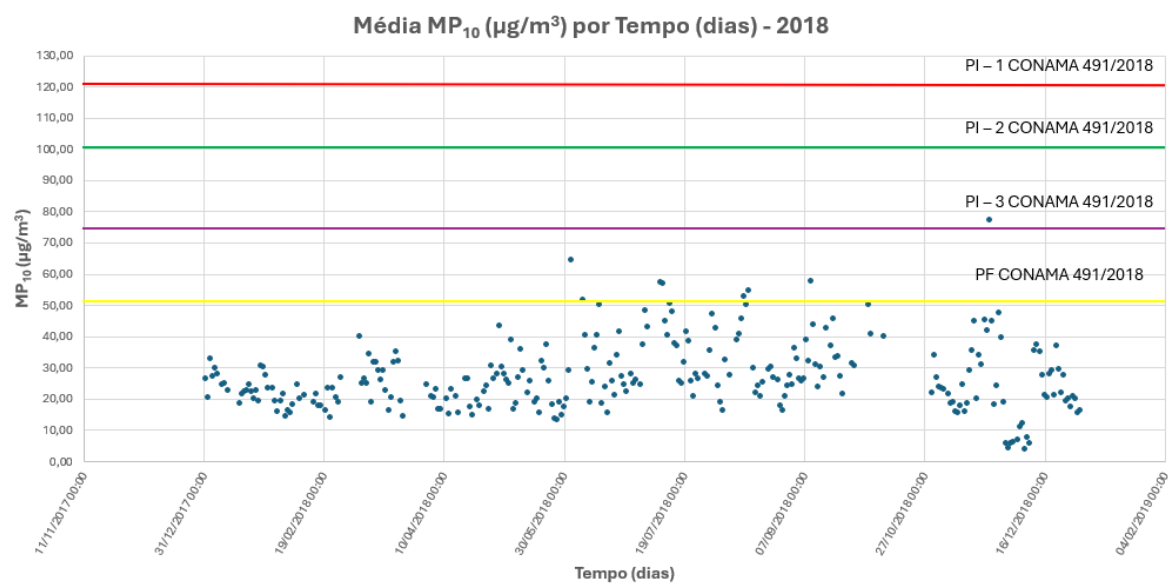
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 33 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2017.



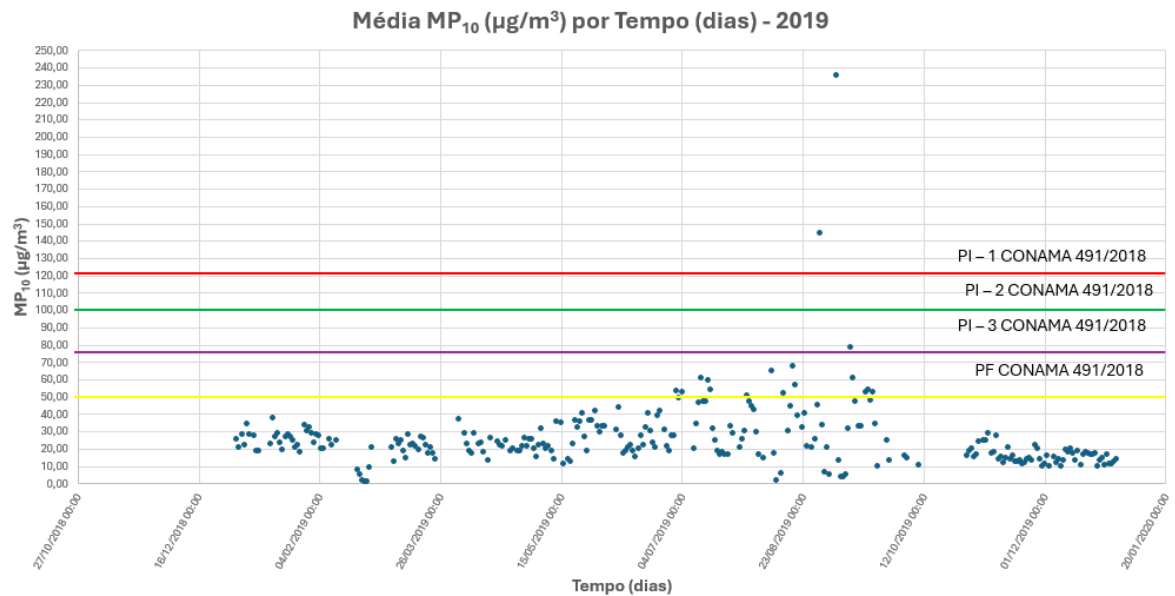
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 34 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2018.



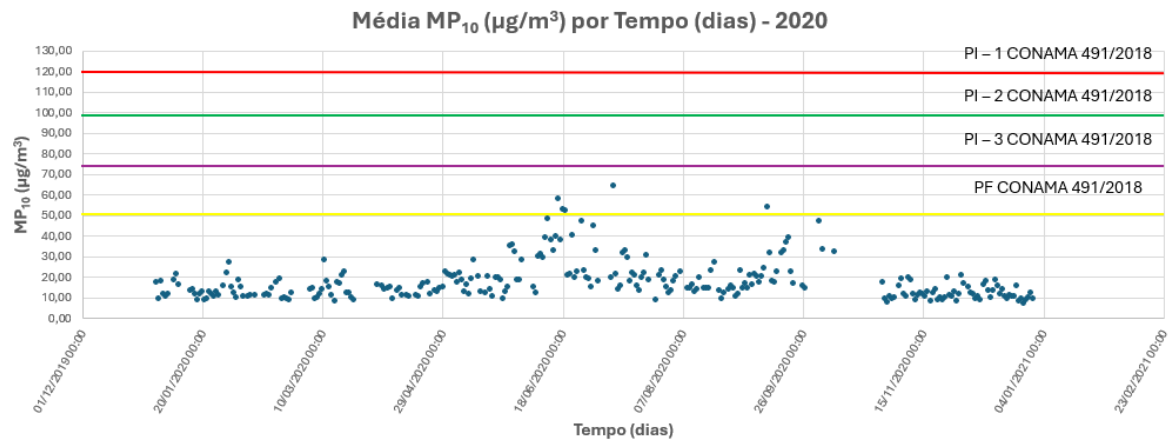
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 35 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2019.



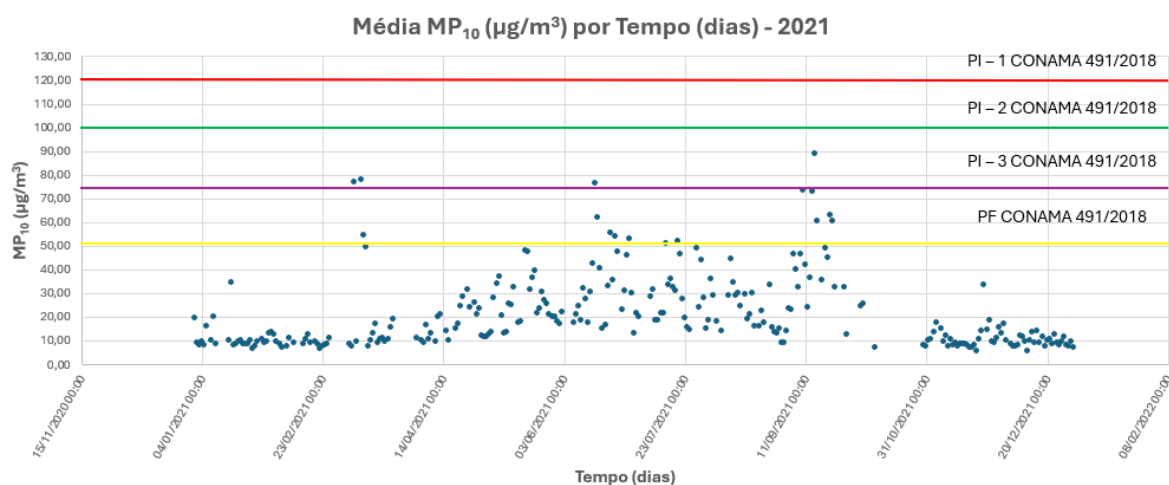
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 36 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2020.



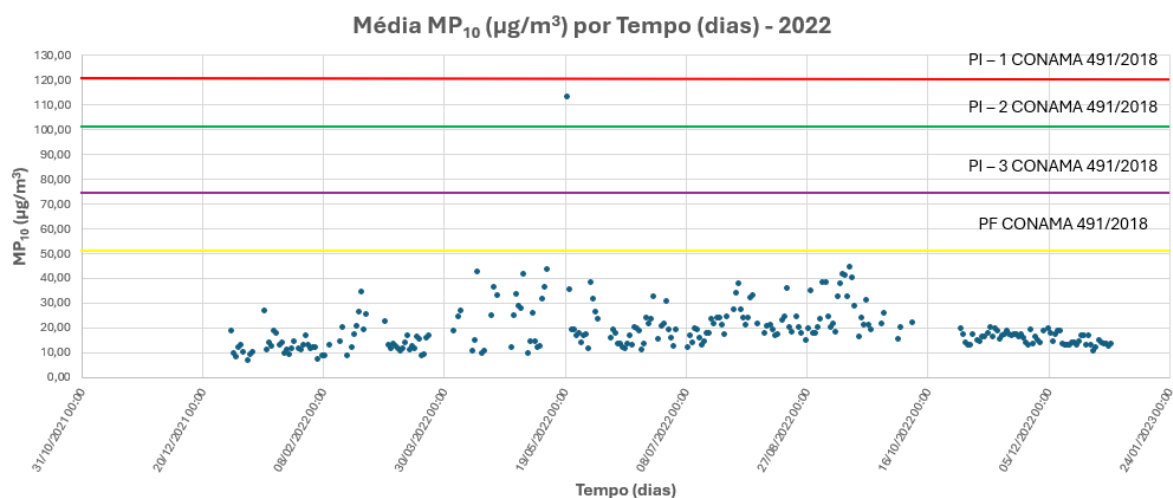
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 37 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2021.



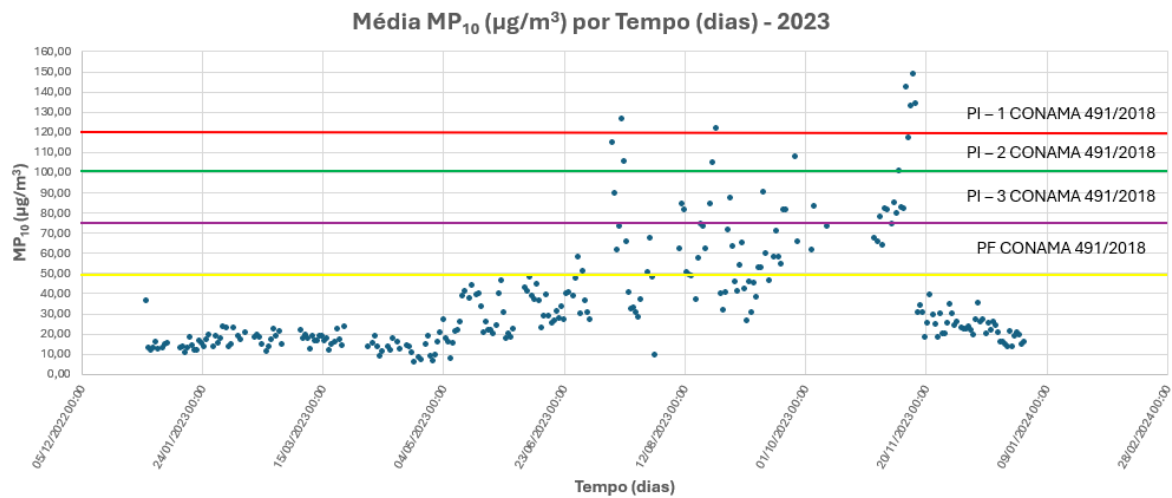
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 38 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2022.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 39 – Variação da concentração média diária de MP_{10} na estação de monitoramento de qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG no ano de 2023.



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir dos dados apresentados nos gráficos, pode-se perceber que a concentração média diária de MP_{10} foi maior na estação Petrovale, e, para ambas as estações, o período compreendido entre junho e setembro apresenta taxas mais altas do poluente. Considerando-se o período mais seco, a menor frequência de ventos e a possibilidade de ocorrência de inversões térmicas, a concentração do poluente tem mais dificuldades de dissipar naturalmente nesse período do ano (FEAM, 2013). Esse resultado também está de acordo com o que foi obtido por Marinho, Nogarotto e Pozza (2022) para as cidades paulistas de Marília e Paulínia. Além disso, o ano de 2023 foi acometido por um período de estiagem mais severa e fortes indícios de queimadas, propiciando ondas de calor e poluição atmosférica visível (CLIMATEMPO, 2023).

Para os dados obtidos foram considerados os padrões vigentes no período, entretanto foram considerados padrões futuros para comparação. Em adição, percebe-se que os valores de concentração média diária de MP_{10} até o ano de 2017 não ultrapassaram os limites do Padrão Intermediário 1 (PI-1) da CONAMA 03/1990 para a estação Delegacia Amazonas, e foram ultrapassados somente uma vez para a estação Petrovale. Entretanto, considerando-se os valores da Resolução CONAMA 491/2018, ambas as estações excederam os valores permitidos em alguns dos anos avaliados e para mais de um dos Padrões Intermediários ou

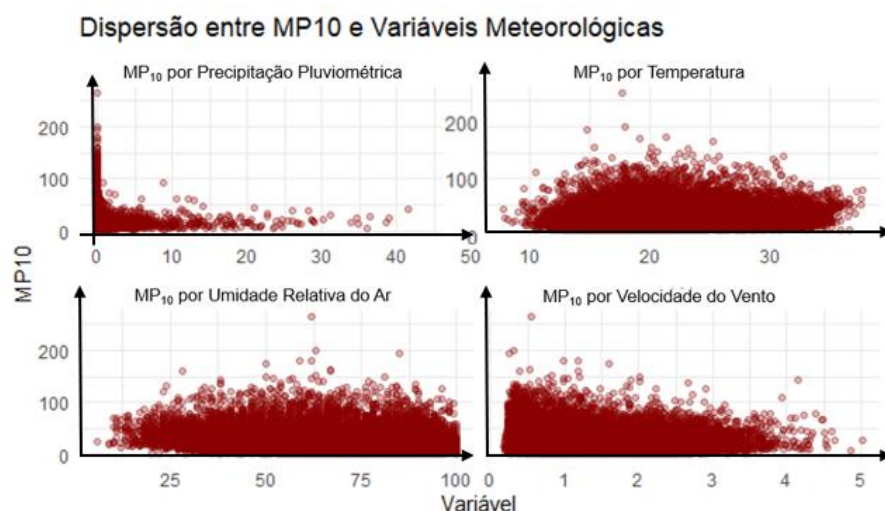
Padrão Final. Novamente, observa-se a predominância das ocorrências no período entre junho e setembro. Resultados parecidos foram obtidos por Santos, Carvalho e Reboita (2016) na avaliação da concentração de materiais particulados na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

Por fim, é possível notar redução das concentrações para ambas as estações ao longo do ano de 2020, coincidindo com o período de *lockdown*. A partir dessa observação, percebe-se a importância do uso de fontes energéticas mais sustentáveis, uma vez que a redução dos veículos nas vias e emissões por parte das indústrias podem ter contribuído para a diminuição da concentração atmosférica dos poluentes neste período.

5.3.2 Variáveis Meteorológicas

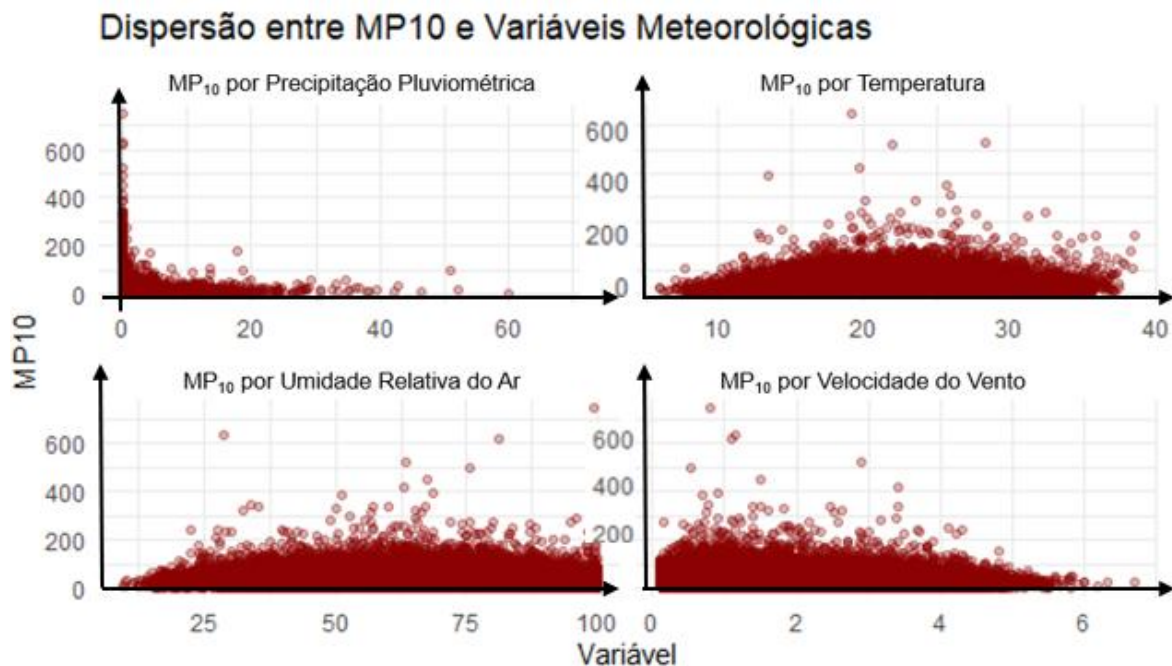
Esta seção apresenta a análise dos gráficos de dispersão relacionando a concentração de MP_{10} e as variáveis meteorológicas referentes aos dados de monitoramento da qualidade do ar nas estações Delegacia Amazonas e Petrovale. Os parâmetros meteorológicos selecionados foram os seguintes: temperatura, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica e velocidade do vento. Na Figura 40 são apresentadas as medidas referentes aos dados relativos à Delegacia Amazonas. Já na Figura 41 são apresentadas as medidas para a estação Petrovale.

Figura 40 – Gráficos de dispersão relacionando MP_{10} e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 41 – Gráficos de dispersão relacionando MP₁₀ e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG.



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir dos dados apresentados nos gráficos, percebe-se a relação inversa entre a concentração de MP₁₀ e a taxa de precipitação pluviométrica para ambas as estações, o que está de acordo com outros trabalhos sobre a temática, como os estudos de Santos, Carvalho e Reboita para cidades do Rio de Janeiro (2018) e São Paulo (2016). Ressalta-se ainda que essa relação não parece ser linear, uma vez que um baixo índice pluviométrico já contribui para expressiva redução da concentração de material particulado na atmosfera. Tal observação pode explicar a fraca correlação negativa apontada na Correlação de Pearson entre essas variáveis. Assim, correlações não lineares devem ser também avaliadas, como por exemplo, via Correlação de Spearman.

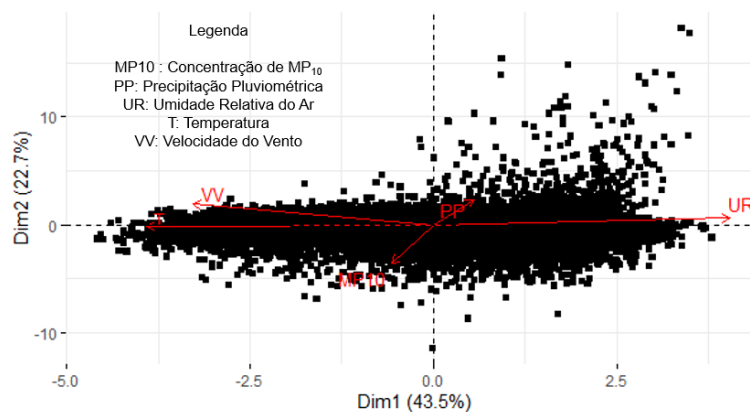
5.4 Análise Multivariada – Gráficos de HCA e PCA

Esta seção apresenta a análise estatística multivariada dos dados de monitoramento da qualidade do ar nas estações Delegacia Amazonas e Petrovale, situadas na RMBH. Estas análises consideraram as concentrações de MP₁₀ ao longo dos períodos anteriormente descritos e as variáveis meteorológicas.

5.4.1 PCA

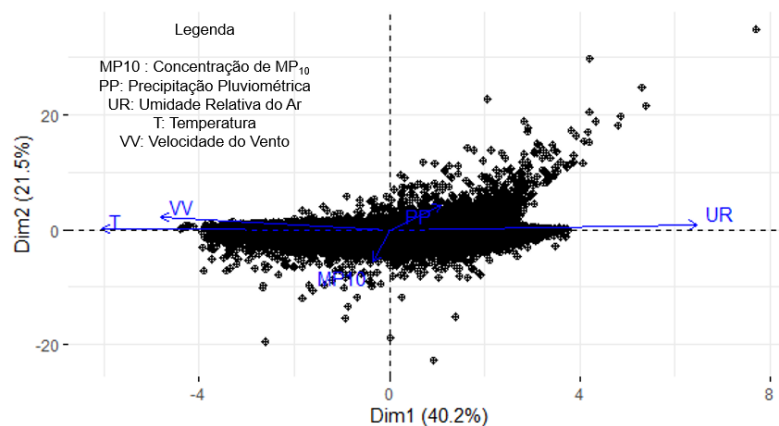
Esta seção apresenta a análise de componentes principais (PCA) referente aos dados de monitoramento da qualidade do ar nas estações Delegacia Amazonas e Petrovale e os parâmetros meteorológicos selecionados: temperatura, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica e velocidade do vento. Na Figura 42 são apresentadas as medidas referentes aos dados relativos à Delegacia Amazonas. Já na Figura 43 são apresentadas as medidas para a estação Petrovale.

Figura 42 – PCA entre MP_{10} e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 43 – PCA entre MP_{10} e parâmetros meteorológicos para a estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG.



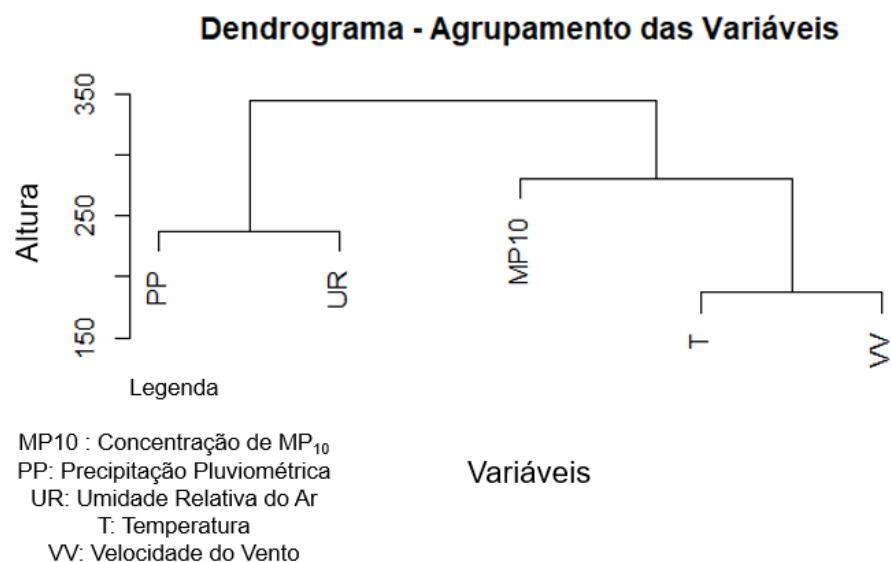
Fonte: Autoria própria (2025)

Considerando-se os resultados apresentados nos gráficos, percebe-se a relação inversa entre a concentração de MP_{10} e a variável meteorológica Precipitação Pluviométrica (PP) principalmente em relação ao fator 1 (Dim1) para ambas as estações, reforçando a ideia de que o aumento desses valores pode levar à maior dispersão e/ou remoção do poluente. Percebe-se também o distanciamento de todas as variáveis meteorológicas em relação ao poluente considerando-se o centro dos eixos, denotando-se pouca correlação positiva entre as variáveis.

5.4.2 HCA

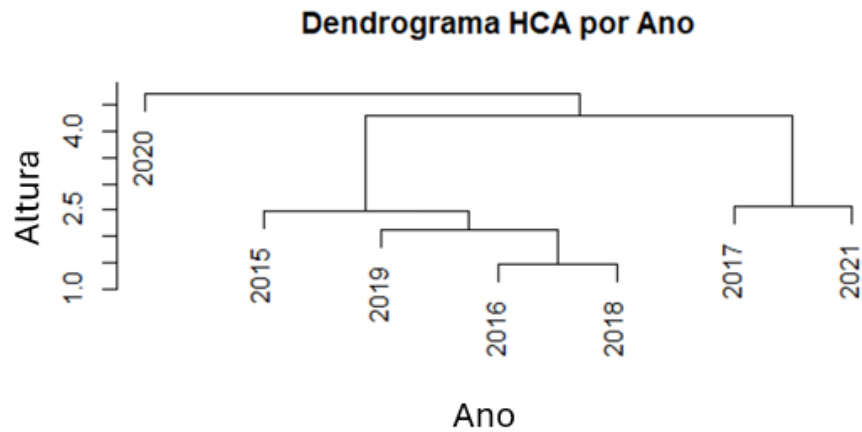
Esta seção apresenta as análises de agrupamento hierárquico (HCA) referente aos dados de monitoramento da qualidade do ar nas estações Delegacia Amazonas e Petrovale. Nas Figuras 44 e 45 são apresentadas as medidas referentes aos dados relativos à Delegacia Amazonas. Já nas Figuras 46 e 47 são apresentadas as medidas para a estação Petrovale.

Figura 44 – Dendrograma da estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas relacionando as variáveis meteorológicas e a concentração de MP_{10} , situada em Belo Horizonte/MG.



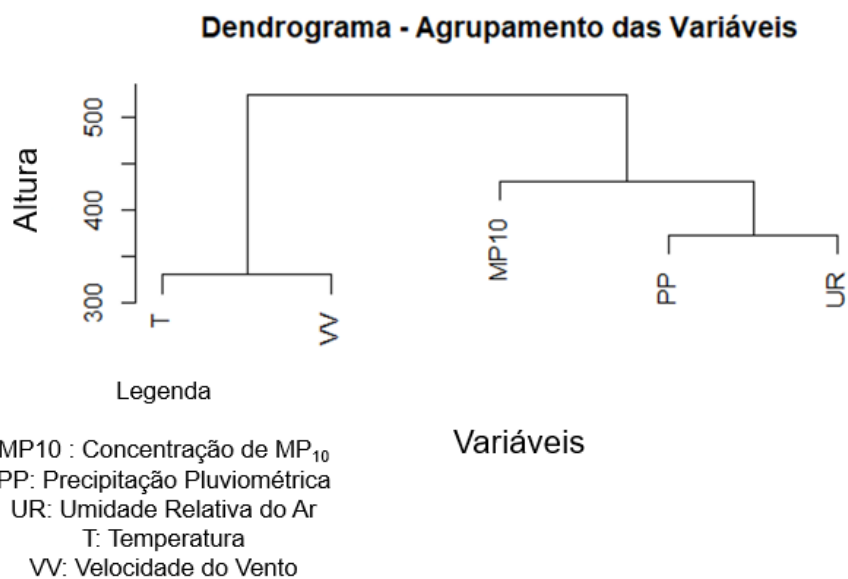
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 45 – Dendrograma da estação de monitoramento da qualidade do ar Delegacia Amazonas, situada em Belo Horizonte/MG, relacionando o período avaliado com relação às concentrações de MP_{10} .



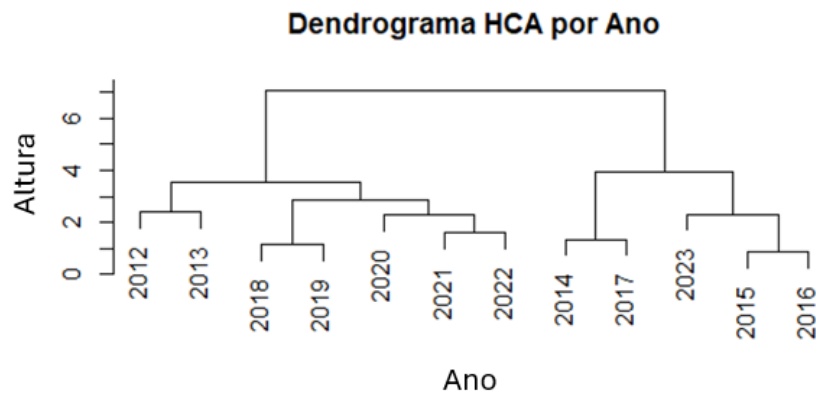
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 46 – Dendrograma da estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG, relacionando as variáveis meteorológicas e a concentração de MP_{10} .



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 47 – Dendrograma da estação de monitoramento da qualidade do ar Petrovale, situada em Betim/MG, relacionando o período avaliado com relação às concentrações de MP_{10} .



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir dos dados apresentados nos dendrogramas relativos às variáveis meteorológicas e a concentração de MP_{10} , pode-se perceber que em ambos os casos a temperatura e a velocidade do vento apareceram em um mesmo agrupamento, assim como a precipitação pluviométrica e a umidade relativa do ar com um outro agrupamento, apresentando assim algum nível de correlação entre as variáveis. Além disso, nos dois dendrogramas relativos às variáveis há formação de um agrupamento entre um dos grupos e a concentração de MP_{10} , sugerindo que há alguma relação entre as variáveis, o que reforça a pequena correlação obtida nas análises de correlação de Pearson anteriormente citadas.

Com relação aos dendrogramas relacionados aos períodos, percebe-se que não há um padrão igual para as duas estações. O que se pode perceber é que há algum nível de separação dos anos a partir dos quais a Resolução CONAMA nº 491/2018 passou a ser vigente. Além disso, o ano de 2020 é um ano atípico em ambas as representações, condizendo com o esperado devido às restrições da pandemia de COVID-19.

A presença de grandes distâncias entre os agrupamentos nos dendrogramas dificulta a discussão quanto à similaridade dos elementos. No HCA aplicado às médias anuais, essas distâncias podem indicar mudanças significativas ao longo dos anos quanto aos níveis de MP_{10} e condições meteorológicas. E para a análise das variáveis, essa distância entre os

agrupamentos sugere que, apesar de que possivelmente exista alguma correlação, o comportamento do poluente não é diretamente explicado pelas variáveis consideradas.

6 CONCLUSÕES

A análise da concentração de MP_{10} na RMBH, no período de 2009 a 2023, permitiu observar importantes tendências associadas à qualidade do ar, tanto em função do contexto urbano-industrial quanto das variações climáticas e sazonais. Os dados analisados demonstram que a Estação Petrovale, situada no município de Betim — região com intensa atividade industrial e alto fluxo veicular — apresentou, com maior frequência, concentrações médias superiores de MP_{10} em relação à Estação Delegacia Amazonas, localizada na área urbana central de Belo Horizonte. No entanto, devido ao valor elevado do desvio padrão, não foi possível encontrar diferença estatisticamente significativa entre os valores médios observados nas duas estações de monitoramento avaliadas.

Além disso, as análises estatísticas apontaram influência de variáveis meteorológicas, principalmente durante o inverno, período em que se observou o agravamento das condições de dispersão de poluentes, com destaque para a baixa umidade relativa do ar, ventos fracos e inversões térmicas. Esses fatores contribuem para a presença de MP_{10} próxima à superfície, potencializando riscos à saúde pública, sobretudo em populações mais vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com comorbidades respiratórias e cardiovasculares.

A correlação entre MP_{10} e parâmetros meteorológicos, embora em geral de intensidade fraca a moderada, destacou o índice pluviométrico e a velocidade do vento como variáveis mais relevantes na modulação das concentrações do poluente. A redução temporária das concentrações observada durante o período de isolamento social na pandemia de COVID-19 reforça o papel das atividades antrópicas nas emissões atmosféricas e evidencia o potencial de políticas públicas voltadas à mobilidade urbana sustentável e à transição energética para tecnologias limpas.

Dessa forma, este estudo contribui com informações relevantes para elaboração de estudos futuros e formulação de estratégias de gestão da qualidade do ar.

7 REFERÊNCIAS

AQUINO, Estela ML et al. **Medidas de distanciamento social no controle da pandemia de COVID-19: potenciais impactos e desafios no Brasil**. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 25, p. 2423-2446, 2020.

BRAGA, Benedito. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 332 p.

BRAGA, A. L. F. *et al.* **Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais Brasil**. *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 23, supl. 4, p. S2571-S2580, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.org/pdf/csp/v23s4/09.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2025.

BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N. Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana. *Trabalho apresentado no evento de sustentabilidade na geração e uso de energia, UNICAMP*, v. 18. Campinas, 2002. Disponível em: https://www.comciencia.br/dossies-1-72/reportagens/cidades/paper_saldiva.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

BRAGA, A.; BOHM, G. M.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. **Poluição atmosférica e saúde humana**. *Revista USP*, São Paulo, n. 51, p. 58-71, 2001.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 28 jun. 2025.

BRASIL. **Lançado o Programa Ar Puro para monitorar a qualidade do ar no Brasil**. Brasília: Casa Civil, 2021. Disponível em: [Lançado o Programa Ar Puro para monitorar a qualidade do ar no Brasil — Casa Civil](#). Acesso em: 24 jan. 2025.

BRASIL. **Lei Complementar nº 14, de 08 de junho de 1973**. Estabelece as regiões metropolitanas de São Paulo, Belo Horizonte, Porto Alegre, Recife, Salvador, Curitiba, Belém e Fortaleza.. **Lei Complementar Nº 14, de 8 de Junho de 1973**. Brasília, Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp14.htm#:~:text=LEI%20COMPLEMENTAR%20N%C2%BA%2014%2C%20DE,Art.. Acesso em: 01 jun. 2025.

BRASIL. **Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 02 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 05 dez. 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024**. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 09 jul. 2024. 2024a. Disponível em: [RESOLUÇÃO Nº 506](#),

[DE 5 DE JULHO DE 2024 - RESOLUÇÃO Nº 506, DE 5 DE JULHO DE 2024 - DOU - Imprensa Nacional](#). Acesso em: 13 jun. 2025.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Mortes devido à poluição aumentam 14% em dez anos no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/2019/junho/mortes-devido-a-poluicao-aumentam-14-em-dez-anos-no-brasil>. Acesso em: 05 nov. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14850, de 02 de maio de 2024**. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar.. Lei Nº 14.850, de 2 de Maio de 2024. Brasília, 02 maio 2024. 2024b. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14850-2-maio-2024-795555-publicacaooriginal-171660-pl.html>. Acesso em: 15 jan. 2025.

BRASIL. (1990) **Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Brasília: CONAMA.

BRASIL. Resolução nº 18, de 06 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. **Resolução Conama Nº 18, de 6 de Maio de 1986**. Brasília, 17 jun. 1986. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=41. Acesso em: 07 jul. 2025.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 21 nov. 2018.

BRITO, GF da S.; SODRÉ, F. F.; ALMEIDA, F. V. **O impacto do material particulado na qualidade do ar**. Revista Virtual de Química, v. 10, n. 5, p. 1335-1354, 2018. Disponível em: [Impact-of-Particulate-Matter-on-Air-Quality.pdf](#). Acesso em: 01 fev. 2025.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Cubatão comemora quatro décadas de Vale com Vida**. 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2024/03/14/cubatao-comemora-quatro-decadas-de-vale-da-vida/#:~:text=O%20munic%C3%ADpio%20paulista%20localizado%20a,pela%20Organiza%C3%A7%C3%A3o%20Mundial%20da%20Sa%C3%BAde>. Acesso em: 04 dez. 2024.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Poluentes. São Paulo: CETESB, 2025. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade do Ar: Histórico**. 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

CLIMATEMPO (org.). **Retrospectiva Clima 2023 do Brasil**. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2023/12/31/retrospectiva-clima-2023-do-brasil-3450>. Acesso em: 09 jul. 2025.

CORÁ, Bianca; LEIRIÃO, Luciana; MIRAGLIA, Simone George El Khouri. **Impacto da poluição do ar na saúde pública em municípios com elevada industrialização no**

estado de São Paulo. Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online), v. 55, n. 4, p. 498–509, 1 jul. 2020. Disponível em: [\(PDF\) Impacto da poluição do ar na saúde pública em municípios com elevada industrialização no estado de São Paulo](#). Acesso em: 02 jul. 2025.

DUARTE, Renata Lopes; SILVA, Cláudio Paiva; ROCHA, Cézar Henrique Barra. **Os efeitos do isolamento social e da pandemia de COVID-19 na qualidade do ar ao redor do mundo.** Periódico eletrônico-Fórum ambiental da Alta Paulista, v. 17, n. 2, 2021.

EPIC - Energy Policy Institute at the University of Chicago. **Air Quality Life Index Report 2024.** Chicago: Energy Policy Institute at the University of Chicago, 2024. Disponível em: https://aqli.epic.uchicago.edu/wp-content/uploads/2024/08/AQLI-2024-Report_English.pdf. Acesso em: 05 dez. 2024.

Fundação Estadual Do Meio Ambiente - FEAM. Monitoramento da Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte Ano Base de 2013. Belo Horizonte: Fundação Estadual Meio Ambiente, 2016. 77 p. Disponível em: [6bfaa3f4-4b1a-84f2-c306-9eee68b4f7b2](#). Acesso em: 04 jun. 2025.

Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM. **Mapas - Estações de Monitoramento da Qualidade do Ar.** Disponível em: <https://comites.igam.mg.gov.br/web/feam/w/mapas-estacoes-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar>. Acesso em: 05 dez. 2024.

GOMES, Pedro César Tebaldi. **Coefficiente de Correlação de Pearson: Cálculo e Aplicação.** 2024. Disponível em: <https://www.datageeks.com.br/coeficiente-de-correlacao-de-pearson/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

GOUVEIA, Nelson; LEON, Antonio Ponce de; JUNGER, Washington; LINS, Joana de Freitas; FREITAS, Clarice Umbelino de. **Poluição do ar e impactos na saúde na Região Metropolitana de Belo Horizonte – Minas Gerais, Brasil.** Ciência & Saúde Coletiva, [S.L.], v. 24, n. 10, p. 3773-3781, out. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1413-812320182410.29432017>.

IBM. **O que é a análise de componentes principais (PCA)?** 2023. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/principal-component-analysis>. Acesso em: 24 jul. 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **Censo 2022: 87% da população brasileira vive em áreas urbanas.** 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41901-censo-2022-87-da-populacao-brasileira-vive-em-areas-urbanas>. Acesso em: 05 dez. 2024.

JACOBS, Elizabeth T.; BURGESS, Jefferey L.; ABBOTT, Mark B.. **The Donora Smog Revisited: 70 years after the event that inspired the clean air act.** American Journal Of Public Health, [S.L.], v. 108, n. 2, p. 85-88, abr. 2018. American Public Health Association. <http://dx.doi.org/10.2105/ajph.2017.304219>.

LEONI, Roberto Campos; SAMPAIO, Nilo Antonio de Souza; CORRÊA, Sergio Machado. **Estatística Multivariada Aplicada ao Estudo da Qualidade do Ar**. Revista Brasileira de Meteorologia, [S.L.], v. 32, n. 2, p. 235-241, jun. 2017. FapUNIFESP (SciELO).

<http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863220005>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbmet/a/NT5B8vrRNCKsDhtLbBJmyvn/?format=html&lang=pt>.

Acesso em: 04 jul. 2025.

LIMA, Y. L.; FARIAS, F. F.; LIMA, A. M. L.; ELISA, M. **Poluição Atmosférica e Clima: Refletindo sobre os padrões de qualidade do ar no Brasil**. REVISTA GEONORTE, Edição Especial 2, V. 2, N. 5, p. 555-564. 2012.

LIU, Feng; WANG, Meichang; ZHENG, Meina. **Effects of COVID-19 lockdown on global air quality and health**. Science Of The Total Environment, [S.L.], v. 755, n. 755, p. 1-13, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020>.

LONE, Shabir Ahmad; AHMAD, Aijaz. **COVID-19 pandemic—an African perspective**. Emerging microbes & infections, v. 9, n. 1, p. 1300-1308, 2020.

LUIZ, Robson. **"Estatística"**; Brasil Escola. Disponível em:

<https://brasilestola.uol.com.br/matematica/estatistica-2.htm>. Acesso em 09 de junho de 2025.

MARINHO, L. V.; NOGAROTTO, D. C.; POZZA, S. A. Análise de tendência de concentração de material particulado atmosférico e efetividade de políticas públicas. **Holos Environment**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 78–93, 2022. DOI: 10.14295/holos.v22i2.12470. Disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/12470>. Acesso em: 4 jul. 2025.

MARQUES, Rodrigo; SANTOS, Emerson Soares dos. **REDES DE MONITORAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO INALÁVEL, LEGISLAÇÃO E OS RISCOS À SAÚDE**. Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, Uberlândia, v. 14, n. 8, p. 115-128, jun. 2012. Disponível em: <http://observatoriodageografia.uepg.br/files/original/1df6926fdc2ab1edb6f8e809b2c1e595f2c94c74.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2025.

MARTINS, Cleyton; ARBILLA, Gabriela. **Emissões atmosféricas e mudanças climáticas**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Freitas Bastos Editora, 2022.

MINAS GERAIS (Estado). **Deliberação Normativa nº 187, de 19 de setembro de 2013**. Estabelece condições e limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas e dá outras providências.. Deliberação Normativa Copam Nº 187 de 19/09/2013. Minas Gerais, 20 set. 2013.

MINITAB. **Dendrograma**. 2025. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/multivariate/how-to/cluster-observations/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/dendrogram/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. Secretaria Nacional de Meio Ambiente Urbano e Qualidade Ambiental. **Revisão da Resolução Conama nº 491/2018: padrões nacionais de qualidade do ar texto aprovado ctqa e validado pela ctaj.. Padrões Nacionais de Qualidade do Ar Texto Aprovado CTQA e validado pela CTAJ..** 2018. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/conama-aprova-prazos-para-novos-padroes-de-qualidade-do-ar/copy_of_ApresentaonoConamaAdalbertoMaluf.pdf. Acesso em: 06 dez. 2024.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. Constituição (2024). **Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024.** Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Resolução Nº 506, de 5 de Julho de 2024. Brasília, 09 jul. 2024.

MOREIRA, J. K. R.; LIMA, A. C. M.; CARDOSO, B. A.; VINAGRE, M. V. A.. **Avaliação da Qualidade do Ar Através de Parâmetros Biológicos e Visuais nos Bairros de São Brás, Nazaré e Cidade Velha, Belém (PA).** Educação Ambiental em Ação, v.53, p.1-16, 2015. Disponível em: <https://www.revistaeca.org/artigo.php?idartigo=2104>. Acesso em: 20 jun. 2025.

NASCIMENTO, Cleonilde Maria do. **Dinâmica de doenças relacionadas à poluição atmosférica nas dez capitais mais populosas do Brasil e potenciais reflexos da pandemia da COVID-19 na evolução desses dados.** Cuadernos de Educación y Desarrollo, [S.L.], v. 16, n. 7, p. 1-26, 4 jul. 2024. South Florida Publishing LLC. <https://dx.doi.org/10.55905/cuadv16n7-029>.

OLIVEIRA, Gabriel Alessandro de. **"Medidas de centralidade: moda";** Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/matematica/medidas-centralidade-moda.htm>. Acesso em 09 de junho de 2025.

OMS. Organização Mundial da Saúde. **Exposure & health impacts of air pollution.** 2025. Disponível em: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/health-impacts/exposure-air-pollution>. Acesso em: 30 jun. 2025.

OMS. Organização Mundial da Saúde. **Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: material particulado (PM2.5 e PM10), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono.** Genebra: Organização Mundial da Saúde, 2021. Disponível em: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54963/9789275724613_por.pdf. Acesso em: 28 jun. 2025.

OPENCADD. **Box plot: o que é e para que serve?** 2022. Disponível em: [Box plot: o que é e para que serve? - OPENCADD](#). Acesso em 09 de junho de 2025.

PATRA, Satya S.; PANDA, Subhasmita; DAS, Trupti; RAMASAMY, Boopathy. COVID-19 Fatality: statistical evidence to engender the need for focal shift from air pollutants to multi-dimensional intervention. **Aerosol And Air Quality Research**, [S.L.], v. 21, n. 1, p.

200410, 2021. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2020.07.0410>.

PEREIRA JUNIOR, José de Sena. **LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE POLUIÇÃO DO AR**. Brasília: Consultoria Legislativa, 2007. Disponível em:
<https://bd.camara.leg.br/bd/items/9767427e-fd73-4244-87fb-7f03035c2bbb>. Acesso em: 28 jun. 2025.

PINHO, Breno Aloísio Torres Duarte de. **População e Pobreza: Uma Análise da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. 2016. 266 f. Tese (Doutorado) - Curso de Demografia do Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em:
https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/FACE-AFSJMB/1/tese_brenopinho_cedeplarufmg.pdf. Acesso em: 26 jun. 2025.

RIBEIRO, Amanda Gonçalves. "**Medidas de dispersão: variância e desvio padrão**"; Brasil Escola. Disponível em:
<https://brasilescola.uol.com.br/matematica/medidas-dispersao-variancia-desvio-padrao.htm>. Acesso em 09 de junho de 2025.

SANTANA, Eduardo *et al.* **Padrões de qualidade do ar: experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia**. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2012. 81 p.

SANTOS, T.C.; CARVALHO, V. S. B.; REBOITA, M. S. (2018). **Investigação da Relação entre Variáveis Atmosféricas e a Concentração de MP10 e O3 no Estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Meteorologia.v. 33, n. 4,p. 631-645. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rbmet/a/DfJjG68rDmhFdqPP9NwPwby/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 04 jun. 2025.

SANTOS, T.C.; CARVALHO, V. S. B.; REBOITA, M. S. (2016). **Avaliação da influência das condições meteorológicas em dias com altas concentrações de material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Eng. Sanit. Ambient.v. 21, n. 2, p. 307-313. Disponível em: [SciELO Brasil - Avaliação da influência das condições meteorológicas em dias com altas concentrações de material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro](https://www.scielo.br/engsanit/a/10.1590/S1519-564820160000200001) Acesso em: 04 jun. 2025.

SANTOS, Fábio Soares dos; PINTO, Janaina Antonino; MACIEL, Felipe Marinho; HORTA, Frederico Silva; ALBUQUERQUE, Taciana Toledo de Almeida; ANDRADE, Maria de Fátima. **Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP2,5) em Belo Horizonte, MG**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 371-381, abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019174045>.

SANTOS, Haroldo Lima *et al.* **Relação entre poluentes atmosféricos e suas consequências para a saúde.** Revista Científica Intr@ ciência, v. 17, p. 01-24, 2019. Disponível em: [20190312105045.pdf](#) . Acesso em: 12 nov. 2024.

SILVA, Alexandre Fernando da; VIEIRA, Carlos Alexandre. **Aspectos da poluição atmosférica: uma reflexão sobre a qualidade do ar nas cidades brasileiras.** Ciência e Sustentabilidade - Ces, Juazeiro do Norte, v. 3, n. 1, p. 166-189, jun. 2017. Semestral.

SILVA, Marcos Noé Pedro da. **"Média aritmética";** Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilestola.uol.com.br/matematica/media-aritmetica.htm>. Acesso em 09 de junho de 2025.

SILVEIRA, Jéssica Garcia da. **Entre o desenvolvimento econômico e os debates sobre meio ambiente: a Secretaria Especial do Meio Ambiente - SEMA, e a política estratégica de proteção ambiental no Brasil (1973-1981).** XXVIII Simpósio Nacional de História, 2015, Florianópolis. XXVIII Simpósio Nacional de História, 2015. v. 1. Disponível em: https://anpuh.org.br/uploads/anais-simposios/pdf/2019-01/1548945023_a32ab770b22487aaa87d85f6a03.pdf. Acesso em: 28 jun. 2025.

SOARES, Pedro Lage. **AValiação dos dados de monitoramento de qualidade do ar de duas estações fixas de Belo Horizonte - Ano Base 2019.** 2021. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

TONUCCI, João *et al.* **Censo 2022: Região Metropolitana de Belo Horizonte continua a 3ª maior do país, mesmo com perda de população da capital.** 2023. Disponível em: https://www.observatoriodasmetropoles.net.br/censo-2022-regiao-metropolitana-de-belo-horizonte-e-a-3a-maior-do-pais-mesmo-com-perda-de-populacao/?utm_source=Boletim&utm_medium=E-mail&utm_campaign=807&utm_content=Censo+2022%3A+Regi%C3%A3o+Metropolitan+a+de+Belo+Horizonte+%C3%A9+a+3%C2%AA+maior+do+pa%C3%ADs%2C+mesmo+com+perda+de+popula%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 01 jun. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). Particulate Matter (PM) Basics. 2019. Disponível em: [Particulate Matter \(PM\) Basics | US EPA](#). Acesso em: 28 jun. 2025.

WILDER-SMITH, Annelies; FREEDMAN, David O. **Isolation, quarantine, social distancing and community containment: pivotal role for old-style public health measures in the novel coronavirus (2019-nCoV) outbreak.** Journal of travel medicine, 2020.

WU, Xiao *et al.* **Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study.** medRxiv, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502>. Acesso em: 30 jun. 2025.

ZHANG, D.; LIU, J.; LI, D. **Tackling Air Pollution in China—What do We Learn from the Great Smog of 1950s in LONDON**. Sustainability 2014, Vol 6, p. 5322-5338.

Disponível em: [Tackling Air Pollution in China—What do We Learn from the Great Smog of 1950s in LONDON](#). Acesso em: 21 jun. 2025.