



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO
AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**



**A evolução da qualidade do ar e a relação com a adoção de políticas públicas para
controle das emissões veiculares na Megacidade do Rio de Janeiro**

FERNANDA VERRI RODRIGUES

Itajubá, 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS

A evolução da qualidade do ar e a relação com a adoção de políticas públicas para controle das emissões veiculares na Megacidade do Rio de Janeiro

FERNANDA VERRI RODRIGUES

Trabalho submetido como parte dos requisitos para aprovação do curso de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Orientadora: Vanessa Silveira Barreto Carvalho
Coorientador: Rafael Silva Capaz

Itajubá, 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS

FERNANDA VERRI RODRIGUES

A evolução da qualidade do ar e a relação com a adoção de políticas públicas para controle das emissões veiculares na Megacidade do Rio de Janeiro

Dissertação aprovada pela banca examinadora em 24 de março de 2026 conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

Banca examinadora:

Dr^a. Vanessa Silveira Barreto Carvalho (Orientadora)
Universidade Federal de Itajubá

Dr. Rafael Silva Capaz (Coorientador)
Universidade Federal de Itajubá

Dr^a. Maria Rita Raimundo e Almeida
Universidade Federal de Itajubá

Dr^a. Débora Souza Alvim
Universidade Estadual de São Paulo

Itajubá, 2026

Dedico este trabalho ao meu pai, Marcos (*in memoriam*), cuja presença, amor e ensinamentos permanecem vivos em mim.

À minha mãe, Erlete, meu alicerce em todos os momentos.

À minha irmã, Camilla, por caminhar ao meu lado sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força, pela saúde e pela capacidade de seguir mesmo nos momentos mais difíceis desta trajetória.

À minha mãe, Erlete, por todo amor, apoio incondicional e força diária. Obrigada por acreditar em mim mesmo quando eu mesma duvidei, e por ser meu alicerce em todos os momentos. À minha irmã, Camilla, pela parceria, pelo carinho e pela paciência. Sua presença tornou os dias mais leves e os desafios mais suportáveis.

À minha orientadora Vanessa Silveira Barreto Carvalho e ao meu coorientador Rafael Silva Capaz, pela orientação, contribuições e aprendizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do programa de pós-graduação, pelos ensinamentos compartilhados e pela contribuição para minha formação acadêmica e profissional. Aos meus amigos, em especial Rafael e Aylla, que compartilharam comigo a jornada do mestrado e contribuíram para tornar o processo mais leve, mesmo diante dos desafios emocionais vivenciados ao longo desse período.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta etapa tão significativa da minha trajetória.

Por último, gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro (Código de Financiamento 001 – Processo 88887.958353/2024-00), à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), ao Instituto de Recursos Naturais (IRN) e ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (POSMARH) pelos recursos disponibilizados.

“Resistiam.”

Vidas Secas, Graciliano Ramos

RESUMO

A qualidade do ar nas regiões metropolitanas brasileiras constitui um desafio crescente, diante de seus impactos sobre a saúde pública, o meio ambiente e a sustentabilidade urbana. Nesse contexto, esta dissertação analisa a evolução da qualidade do ar registrada nos últimos 25 anos, entre 1998 e 2023, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), com foco nos impactos da implementação de políticas públicas para o controle de emissões veiculares. Para isso, foram utilizados dados provenientes de 26 estações da rede automática de monitoramento do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), abrangendo séries temporais dos principais poluentes atmosféricos (CO, O₃, NO₂, SO₂, MP₁₀ e MP_{2,5}). A análise considerou a variabilidade temporal, padrões sazonais, distribuição espacial das concentrações e a frequência de excedências aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 e às diretrizes da Organização Mundial da Saúde (2021). A metodologia incluiu o tratamento estatístico das séries históricas, identificação de eventos extremos e análise integrada entre concentrações observadas e estimativas de emissões veiculares, elaboradas com base em dados de frota, consumo de combustíveis e fatores médios de emissão associados às fases do PROCONVE. Os resultados evidenciam redução consistente nas concentrações de poluentes primários ao longo do período analisado. O CO apresentou redução de aproximadamente 57,9% entre 2002 e 2023, com valores médios passando de cerca de 1,9 ppm para menos de 0,8 ppm. O NO₂ também apresentou queda significativa, especialmente após 2012, associada à adoção de tecnologias de controle veicular, capazes de reduzir as emissões de NO_x em até 60% em veículos pesados. O SO₂ apresentou declínio acentuado desde os anos 2000, em resposta à redução do teor de enxofre nos combustíveis, de aproximadamente 2.000 ppm na década de 1990 para cerca de 10 ppm na década de 2010. Em contraste, o material particulado apresentou comportamento mais crítico. O MP₁₀ registrou elevada frequência de excedências ao padrão diário (100 µg/m³), frequentemente superior a 100 dias por ano em diversas estações. O MP_{2,5} apresentou situação ainda mais preocupante, com registros superiores a 300 dias por ano acima dos valores de referência em algumas localidades, evidenciando exposição crônica da população. O ozônio (O₃), por sua vez, manteve níveis elevados e excedências recorrentes ao longo da série histórica, sem tendência clara de redução, refletindo a complexidade associada à formação de poluentes secundários. Do ponto de vista espacial, identificaram-se áreas críticas, especialmente na Baixada Fluminense, com destaque para o município de Duque de Caxias, caracterizado por elevada frequência de excedências, associada à combinação de fontes veiculares e industriais e a condições socioambientais desfavoráveis. A comparação entre emissões absolutas e relativas indica que, embora os avanços tecnológicos associados às políticas públicas tenham reduzido significativamente o potencial emissor médio da frota, o crescimento do número de veículos tende a atenuar as reduções nas cargas totais emitidas. O estudo reforça a importância da continuidade e do aprimoramento das políticas públicas ambientais, da integração entre controle tecnológico e planejamento urbano e do fortalecimento da rede de monitoramento atmosférico como instrumentos fundamentais para promover melhorias sustentadas na qualidade do ar e na saúde da população da RMRJ.

Palavras-chave: Rio de Janeiro; poluição atmosférica; monitoramento da qualidade do ar; PROCONVE; séries temporais.

ABSTRACT

Air quality in Brazilian metropolitan regions has become an increasing challenge due to its impacts on public health, the environment, and urban sustainability. In this context, this dissertation analyzes the evolution of air quality recorded over the last 25 years, between 1998 and 2023, in the Metropolitan Area of Rio de Janeiro (MARJ), focusing on the impacts of the implementation of public policies for vehicular emissions control. To this end, data from 26 automatic monitoring stations of the State Environmental Institute (INEA) were used, comprising time series of the main atmospheric pollutants (CO, O₃, NO₂, SO₂, PM₁₀, and PM_{2.5}). The analysis considered temporal variability, seasonal patterns, spatial distribution of concentrations, and the frequency of exceedances of the standards established by CONAMA Resolution No. 491/2018 and the World Health Organization (2021) guidelines. The methodology included statistical treatment of historical series, identification of extreme events, and integrated analysis between observed concentrations and estimates of vehicular emissions, based on fleet data, fuel consumption, and average emission factors associated with the phases of PROCONVE. The results indicate a consistent reduction in the concentrations of primary pollutants over the analyzed period. CO showed a reduction of approximately 57.9% between 2002 and 2023, with mean values decreasing from about 1.9 ppm to less than 0.8 ppm. NO₂ also showed a significant decline, particularly after 2012, associated with the adoption of vehicle emission control technologies capable of reducing NO_x emissions by up to 60% in heavy-duty vehicles. SO₂ showed a marked decrease since the 2000s, in response to the reduction of sulfur content in fuels, from approximately 2,000 ppm in the 1990s to around 10 ppm in the 2010s. In contrast, particulate matter exhibited a more critical behavior. PM₁₀ showed a high frequency of exceedances of the daily standard (100 µg/m³), often exceeding 100 days per year at several monitoring stations. PM_{2.5} presented an even more concerning scenario, with records exceeding 300 days per year above reference values in some locations, indicating chronic population exposure. Ozone (O₃), in turn, remained at elevated levels with recurrent exceedances throughout the historical series, with no clear decreasing trend, reflecting the complexity associated with secondary pollutant formation. From a spatial perspective, critical areas were identified, particularly in Baixada Fluminense, with emphasis on the municipality of Duque de Caxias, characterized by a high frequency of exceedances associated with the combination of vehicular and industrial sources and unfavorable socio-environmental conditions. The comparison between absolute and relative emissions indicates that, although technological advances associated with public policies have significantly reduced the average emission potential of the fleet, the growth in the number of vehicles tends to offset reductions in total emitted loads. This study reinforces the importance of the continuity and improvement of environmental public policies, the integration between technological control and urban planning, and the strengthening of air quality monitoring networks as key instruments to promote sustained improvements in air quality and public health in the RMRJ.

Keywords: Rio de Janeiro; air pollution; air quality monitoring; PROCONVE; time series.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.....	20
Figura 2 - Localização das estações de monitoramento da Qualidade do Ar usadas para análise em relação à RMRJ.....	22
Figura 3 - Concentração média anual de CO, em PPM, nas estações da RMRJ, no período 2002-2023.....	28
Figura 4 - Concentração média anual de O ₃ , em PPM, nas estações da RMRJ, no período 2002–2023.....	29
Figura 5 - Concentração média anual de NO ₂ , em µg/m ³ , nas estações da RMRJ, no período 2002–2023.....	29
Figura 6 - Concentração média anual de SO ₂ , em µg/m ³ , nas estações da RMRJ, no período 1998–2023.....	30
Figura 7 - Concentração média anual de MP ₁₀ , em µg/m ³ , nas estações da RMRJ, no período 2002–2023.....	30
Figura 8 - Concentração média anual de MP _{2,5} , em µg/m ³ , nas estações da RMRJ, no período 2017–2023.....	31
Figura 9 – Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de CO acima do padrão PI-2 (média móvel de 8 horas superior a 9 ppm), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018.....	35
Figura 10 – Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de O ₃ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo (PI-2 = 130 µg/m ³ , máximo diário da média móvel de 8 horas), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018.....	36
Figura 11 - Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de NO ₂ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo (PI-2 = 240 µg/m ³ , média horária), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018.....	36
Figura 12 - Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de SO ₂ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo (PI-2 = 50 µg/m ³ , média de 24 horas), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018.....	37
Figura 13 - Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de MP ₁₀ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo (PI-2 = 100 µg/m ³ , média de 24 horas), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018.....	37

Figura 14 – Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de $MP_{2,5}$ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo ($PI-2 = 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, média de 24 horas), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018.....	38
Figura 15 - Distribuição mensal dos poluentes atmosféricos na RMRJ.....	41
Figura 16 - Variação horária das concentrações de poluentes atmosféricos ao longo dos dias da semana na RMRJ.....	44
Figura 17 - Distribuição sazonal dos valores extremos (P90) dos poluentes atmosféricos na RMRJ.....	47
Figura 18 - Relação entre concentrações médias anuais medidas e emissões veiculares estimadas de CO, NOx e MP, por fase do PROCONVE (L3–L7), em abordagens absoluta (10^6 t/ano) e relativa ($\text{t/veículo}\cdot\text{ano}$).....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fases do PROCONVE e limites/metas de emissões para veículos leves.....	15
Tabela 2 - Fases do PROCONVE e limites/metas de emissões para veículos pesados.....	15
Tabela 3 - Síntese de estudos científicos sobre poluição atmosférica no Estado do Rio de Janeiro.....	16
Tabela 4 - Estações de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e respectivos poluentes monitorados	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Compostos orgânicos voláteis
HCNM	Hidrocarbonetos não metano
MP	Material particulado
MP _{2,5}	Material particulado fino
MP ₁₀	Material particulado inalável
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO _x	Óxidos de nitrogênio
WHO	Organização Mundial da Saúde
PROCONVE	Programa de Controle da poluição do ar por Veículos automotores
P90	Percentil 90
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SO ₂	Dióxido de enxofre

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO COM REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2. OBJETIVO.....	19
2.1. Objetivo geral.....	19
2.2. Objetivos específicos.....	19
3. METODOLOGIA.....	20
3.1. Área de estudo.....	20
3.2. Dados utilizados.....	21
3.3. Análises dos dados das estações de monitoramento.....	23
3.4. Avaliação da relação qualidade do ar e dados de emissões veiculares.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1. Variabilidade de longo período.....	28
4.2. Variabilidade Sazonal e Horária.....	41
4.3. Eventos Extremos de O ₃ , MP ₁₀ e MP _{2,5}	45
4.4. Relação entre concentrações médias anuais e emissões veiculares estimadas (CO, NO _x e MP).....	48
4.5. Relação com as Políticas Públicas.....	52
5. CONCLUSÕES.....	56
6. REFERÊNCIAS.....	58

1. INTRODUÇÃO COM REFERENCIAL TEÓRICO

O crescimento urbano acelerado está diretamente ligado ao desenvolvimento econômico, à diversificação industrial e ao aumento significativo do uso de combustíveis fósseis, fatores que contribuem para a intensificação das emissões de poluentes atmosféricos e para a degradação da qualidade do ar em diversas regiões do mundo (Santos, 2018). Esse fenômeno é particularmente evidente em grandes metrópoles, onde a elevada densidade populacional e limitações no planejamento urbano favorecem o acúmulo de poluentes na atmosfera (Sobrinho et al., 2024).

A poluição atmosférica configura-se como um dos principais desafios ambientais contemporâneos, com impactos diretos sobre a saúde humana, o meio ambiente e a qualidade de vida da população. Estima-se que a exposição à poluição do ar seja responsável por aproximadamente 4,2 milhões de mortes prematuras por ano em nível global, sendo o material particulado fino ($MP_{2,5}$) um dos principais fatores de risco (WHO, 2021). A exposição prolongada a esses poluentes está associada ao aumento da incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, além de outros efeitos sistêmicos relevantes (Brasil, 2021; Saldiva, 2023).

A problemática da poluição atmosférica não se restringe a regiões específicas, mas constitui um desafio global que afeta centros urbanos em diferentes níveis de desenvolvimento. Estima-se que cerca de 90% das áreas urbanas no mundo não atendem aos padrões estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (WHO), evidenciando a magnitude do problema e seus impactos sobre a saúde e o bem-estar da população (WHO, 2018). Em áreas metropolitanas, o crescimento desordenado da frota veicular tem contribuído significativamente para o aumento das emissões, agravando a degradação da qualidade do ar (Abe; Miraglia, 2018).

Megacidades, definidas como áreas metropolitanas com mais de 10 milhões de habitantes, concentram desafios ambientais complexos, decorrentes do rápido crescimento populacional, da intensificação das atividades econômicas e do aumento da demanda energética (Molina et al., 2020). Nesses ambientes, além das fontes locais de emissão — como transporte, indústrias e geração de energia —, a qualidade do ar também é influenciada pelo transporte de poluentes em escala regional. Estudos indicam, por exemplo, que emissões provenientes da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) podem ser transportadas para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), evidenciando a interdependência entre

regiões e o papel das condições meteorológicas na dispersão e transformação dos poluentes (Duarte et al., 2021; Mendes et al., 2023).

Embora a poluição atmosférica e as mudanças climáticas sejam problemáticas inter-relacionadas, elas envolvem diferentes conjuntos de poluentes e escalas de impacto. Enquanto a qualidade do ar está associada principalmente a poluentes como material particulado, NO_2 e O_3 , as mudanças climáticas são impulsionadas predominantemente por gases de efeito estufa, como CO_2 e CH_4 . No entanto, ambas compartilham fontes comuns, especialmente a queima de combustíveis fósseis, o que reforça a necessidade de estratégias integradas de mitigação.

Nesse contexto, a qualidade do ar é orientada por padrões estabelecidos em âmbito nacional e internacional. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 03/1990 instituiu os primeiros padrões nacionais de qualidade do ar, posteriormente atualizados pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que introduziu limites mais restritivos e metas intermediárias (PI-1, PI-2 e padrão final), buscando alinhamento progressivo com as diretrizes internacionais. Em paralelo, a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021) estabelece valores mais rigorosos, evidenciando diferenças significativas em relação aos padrões nacionais. Para o material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$), por exemplo, o valor guia diário recomendado pela OMS é de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto o padrão intermediário PI-2 da legislação brasileira estabelece limite de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando desafios na convergência entre os referenciais regulatórios e a proteção da saúde.

Em áreas urbanas, as principais fontes antropogênicas de poluição atmosférica incluem a combustão de combustíveis fósseis, processos industriais, incineração de resíduos e a frota veicular. Dentre essas fontes, o transporte rodoviário destaca-se como um dos principais responsáveis pelas emissões de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COV) e material particulado (MP), contribuindo significativamente para a degradação da qualidade do ar (Silva; Silva Júnior, 2019; Zhu et al., 2021).

Diante desse cenário, políticas públicas voltadas ao controle das emissões veiculares têm sido implementadas em diversos países. No Brasil, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), instituído em 1986, desempenha papel central nesse processo, promovendo a adoção de tecnologias mais limpas e a melhoria da qualidade dos combustíveis.

As diferentes fases do PROCONVE, bem como os limites de emissão progressivamente mais restritivos estabelecidos ao longo do tempo, são apresentados nas Tabelas 1 e 2, para veículos leves e pesados, respectivamente.

Tabela 1: Fases do PROCONVE e limites/metras de emissões para veículos leves

Proconve	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	Resolução CONAMA (nº/ano)	Vigência
L1	24,00	2,10	2,00	18/1985	1989-1993
L2	12,00	1,20	1,40	08/1993	1994-1995
L3	2,00	0,30	0,60	08/1993	1996-1999
L4	2,00	0,16	0,25	08/1993	2000-2005
L5	2,00	0,05	0,12	315/2002	2006-2008
L6	1,30	0,05	0,08	315/2002	2009-2012
L7	1,00		0,08	492/2018 403/2008	2012-2021
L8	1,00-0,04		0,08-0,02	492/2018 403/2008	2022/2025

Tabela 2: Fases do PROCONVE e limites/metras de emissões para veículos pesados

Proconve	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Resolução CONAMA (nº/ano)	Vigência
P1	14,00	3,50	18,00	18/1985	1989-1993
P2	11,20	2,45	14,40	08/1993	1994-1995
P3	4,90	1,23	9,00	08/1993	1996-1999
P4	4,00	1,10	7,00	08/1993	2000-2005
P5	2,10	0,66	5,00	315/2002	2006-2008
P6	1,50	0,46	3,50	315/2002	2009-2012
P7	1,50	0,46	2,00	492/2018 403/2008	2012-2021
P8	1,50	0,13	0,40	492/2018 403/2008	2022/2025

Estudos indicam reduções expressivas nas emissões ao longo das últimas décadas, especialmente para o monóxido de carbono (CO), embora tais resultados devam ser interpretados considerando a influência conjunta de fatores tecnológicos, regulatórios e estruturais da frota (COPPE/UFRJ, 2010; Brasil, 2014).

Nos últimos anos, a eletrificação da frota veicular tem sido apontada como uma estratégia promissora para a redução das emissões urbanas, especialmente de poluentes locais. No entanto, seus efeitos ainda são incipientes no contexto brasileiro, sendo mais relevante como uma tendência futura do que como um fator determinante na evolução histórica da qualidade do ar nas grandes regiões metropolitanas.

No contexto brasileiro, a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) apresenta características que a tornam particularmente relevante para estudos sobre poluição atmosférica. Trata-se da segunda maior economia do país, com elevada densidade populacional, intensa atividade industrial e grande volume de veículos em circulação, fatores que influenciam diretamente a emissão, dispersão e concentração de poluentes atmosféricos (IBGE, 2022).

O monitoramento da qualidade do ar na RMRJ teve início no final da década de 1960, sendo posteriormente ampliado com a consolidação da rede automática operada pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Esses dados têm subsidiado diversos estudos científicos e ações de gestão ambiental, contribuindo para o entendimento da dinâmica da poluição atmosférica na região. A síntese de estudos científicos sobre poluição atmosférica no estado do Rio de Janeiro é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Síntese de estudos científicos sobre poluição atmosférica no Estado do Rio de Janeiro

Referência	Objetivo	Dados e Período analisados	Principais “conclusões”
Santos, Carvalho e Reboita (2016).	Avaliar a influência das condições meteorológicas sobre os episódios de altas concentrações de MP ₁₀ na RMRJ.	Concentrações de MP ₁₀ provenientes da rede de monitoramento do INEA (2008 - 2014), sob influência das variáveis meteorológicas como: temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento, precipitação e pressão atmosférica.	Os episódios de alta concentração de MP ₁₀ ocorreram principalmente em condições de baixa velocidade dos ventos, baixa umidade e ausência de precipitação, fatores que dificultam a dispersão dos poluentes. O estudo reforça a importância da meteorologia na gestão da qualidade do ar, destacando que estratégias preventivas devem considerar condições atmosféricas para

			mitigar impactos à saúde pública.
Referência	Objetivo	Dados e Período analisados	Principais “conclusões”
Soares et al. (2018).	Avaliar o impacto na qualidade do ar após a implantação do BRS (Bus Rapid Service) no Rio de Janeiro.	Dados de monitoramento de poluentes atmosféricos coletados antes e após a implantação do BRS (2010-2016).	Observou redução nas concentrações de poluentes após a implantação do BRS, indicando melhoria na qualidade do ar devido à reorganização do transporte público.
Dantas et al. (2020).	Avaliar a qualidade do ar antes e durante o lockdown parcial, focando nos poluentes MP ₁₀ , NO ₂ e CO.	Dados de monitoramento de poluentes atmosféricos entre os meses de março e abril de 2020.	Redução significativa nas concentrações de NO ₂ e CO, diretamente associados ao tráfego veicular, refletindo o impacto da diminuição da circulação de veículos. A redução de MP ₁₀ foi mais modesta, indicando que outras fontes influenciam a poluição por partículas.
Ventura et al. (2022).	Analisar o impacto do sistema de transporte na qualidade do ar no Rio de Janeiro.	Dados de monitoramento de poluentes atmosféricos e informações sobre o sistema de transporte (2013-2017).	Constatou que a qualidade do ar está diretamente relacionada ao sistema de transporte, destacando a necessidade de políticas públicas que promovam modos de transporte mais sustentáveis.
Arbilla, Dantas e da Silva (2023).	Avaliar como a Floresta da Tijuca influencia a qualidade do ar urbano e o bem-estar dos cidadãos, comparando as concentrações de hidrocarbonetos dentro da floresta com duas áreas urbanas da cidade.	Dados de monitoramento de poluentes atmosféricos conduzido em 2023.	A Floresta da Tijuca atuou como um refúgio local de ar mais limpo, com menores níveis de hidrocarbonetos precursores de ozônio, resultando em menor formação de ozônio e benefícios para a saúde e qualidade de vida dos visitantes e moradores.
Justo et al. (2023).	Avaliar como a frota de ônibus e as obras de infraestrutura de transporte impactaram a qualidade do ar na cidade do Rio de Janeiro.	Dados dos principais poluentes relacionados ao transporte urbano — como NO ₂ e SO ₂ , abrangendo os anos em torno de 2016, quando ocorreram as principais obras e modernizações no sistema de transporte.	Houve redução nas concentrações de NO ₂ , indicando melhora relacionada à modernização da mobilidade urbana, mas também um aumento nos níveis de SO ₂ , atribuído ao uso intensivo de ônibus a diesel. No geral, apontou-se um efeito positivo, com benefícios predominantes à saúde pública e ao meio ambiente urbano.

Entretanto, muitos estudos existentes apresentam caráter pontual, focando em poluentes específicos, períodos limitados ou eventos isolados, e raramente integram a análise da evolução temporal da qualidade do ar com o contexto das políticas públicas de controle de emissões. Assim, persiste uma lacuna na compreensão integrada entre as tendências observadas nas concentrações atmosféricas e os efeitos das políticas regulatórias implementadas ao longo do tempo.

Diante disso, este estudo tem como objetivo analisar a evolução da qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro ao longo do período de 1998 a 2023, com ênfase na relação entre as concentrações observadas dos principais poluentes atmosféricos e as políticas públicas de controle das emissões veiculares, especialmente aquelas associadas ao PROCONVE. A análise busca avaliar, de forma integrada, as tendências temporais, padrões sazonais e espaciais, bem como a ocorrência de excedências aos padrões de qualidade do ar.

Embora a presente pesquisa investigue a evolução da qualidade do ar à luz da implementação de políticas públicas, não se pretende estabelecer uma relação causal direta entre tais políticas e as variações observadas nas concentrações atmosféricas. Considerando a complexidade dos processos que determinam a qualidade do ar — incluindo fatores meteorológicos, transformações químicas e dinâmicas urbanas —, o estudo adota uma abordagem interpretativa, buscando avaliar se as tendências observadas são consistentes com o avanço regulatório e tecnológico do setor veicular.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Avaliar a evolução da qualidade do ar registrada nos últimos 25 anos, entre 1998 e 2023, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, com foco nos impactos da implementação de políticas públicas para o controle de emissões veiculares.

2.2. Objetivos específicos

- Verificar o atendimento das concentrações de poluentes registrados na RMRJ aos valores máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 491/2018 e pela WHO (2021);
- Relacionar a evolução da qualidade do ar à luz da implementação de políticas públicas voltadas ao controle das emissões veiculares na região;
- Identificar a relação entre as concentrações observadas e as estimativas de emissões veiculares baseadas nas fases do PROCONVE.

3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) abrange 22 municípios e possui uma população de aproximadamente 12,02 milhões de habitantes (disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?localidade=33>). Criada em 1974, a região passou por diversas redefinições territoriais até a promulgação da Lei Complementar Estadual nº 184/2018, que estabeleceu sua configuração atual. Os municípios que a compõem são: Belford Roxo, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Itaguaí, Japeri, Magé, Maricá, Mesquita, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Petrópolis, Queimados, Seropédica, São Gonçalo, São João de Meriti, Tanguá, Cachoeiras de Macacu, Rio Bonito e Rio de Janeiro.

A configuração territorial da RMRJ é apresentada na Figura 1.

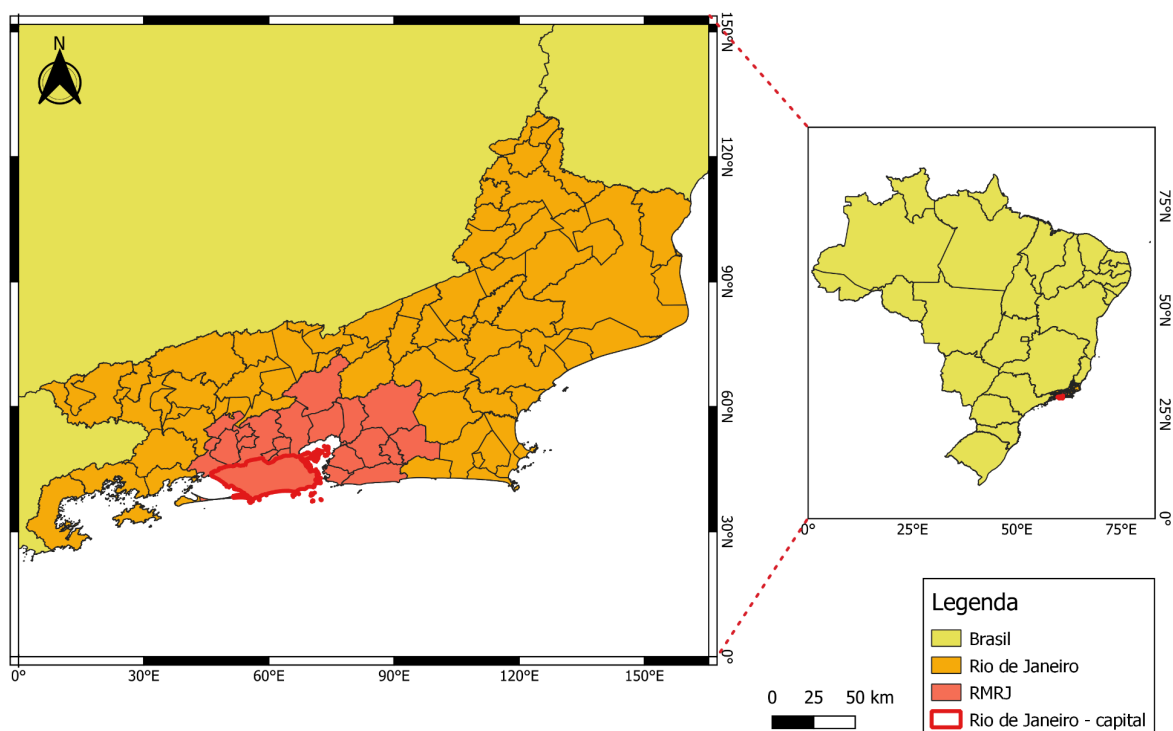


Figura 1 - Localização da Região Metropolitana do Rio de Janeiro

A RMRJ caracteriza-se por elevada densidade populacional, intensa atividade econômica e grande volume de veículos em circulação, fatores que influenciam diretamente a emissão e a concentração de poluentes atmosféricos. De acordo com dados do INEA (2022),

o Estado do Rio de Janeiro possui aproximadamente 2.389.294 veículos (disponível em: https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2024/06/Invent%C3%A1rio-de-Emiss%C3%B5es-Veiculares-Ano-Base-2022-final_ok.pdf - Apêndice A), com maior concentração nos municípios do Rio de Janeiro, São Gonçalo e Duque de Caxias.

Além das características socioeconômicas, a dinâmica atmosférica regional exerce papel fundamental na dispersão e no acúmulo de poluentes. A RMRJ apresenta clima predominantemente tropical, com variações locais influenciadas por fatores geográficos como relevo, maritimidade e grau de urbanização. Esses fatores afetam diretamente os processos de transporte, dispersão e transformação química dos poluentes, sendo relevantes para a interpretação dos padrões observados de qualidade do ar.

A urbanização intensa contribui para a formação de ilhas de calor, especialmente em áreas densamente povoadas e com baixa cobertura vegetal. Além disso, a região é suscetível à ocorrência de eventos extremos, como chuvas intensas e episódios de calor extremo, que influenciam as condições de dispersão atmosférica. Essas características, associadas à topografia complexa e à expansão urbana, reforçam a importância de considerar os fatores meteorológicos na análise da qualidade do ar.

Segundo inventários de emissões veiculares do INEA (2016), o setor de transportes constitui a principal fonte de poluição atmosférica na RMRJ, sendo responsável por aproximadamente 70% das emissões. Esse cenário evidencia a forte relação entre mobilidade urbana e qualidade do ar e justifica a ênfase deste estudo nas emissões veiculares.

3.2. Dados utilizados

Foram utilizados dados horários de qualidade do ar disponibilizados pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), abrangendo o período de 1998 a 2023. Esse intervalo foi definido com base na disponibilidade das séries históricas mais longas e consistentes da rede de monitoramento, permitindo a análise da evolução temporal da qualidade do ar ao longo de diferentes fases das políticas públicas de controle de emissões.

As informações foram obtidas a partir de 26 estações automáticas distribuídas na RMRJ, que fornecem dados contínuos e sistematizados. Os poluentes analisados foram: monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), material particulado inalável (MP₁₀) e material particulado fino (MP_{2,5}), selecionados com base em sua relevância para a saúde pública e nos padrões de qualidade do ar estabelecidos por legislações nacionais e internacionais.

A localização das estações é apresentada na Figura 2, enquanto informações detalhadas — incluindo período de operação e poluentes monitorados — são apresentadas na Tabela 4.

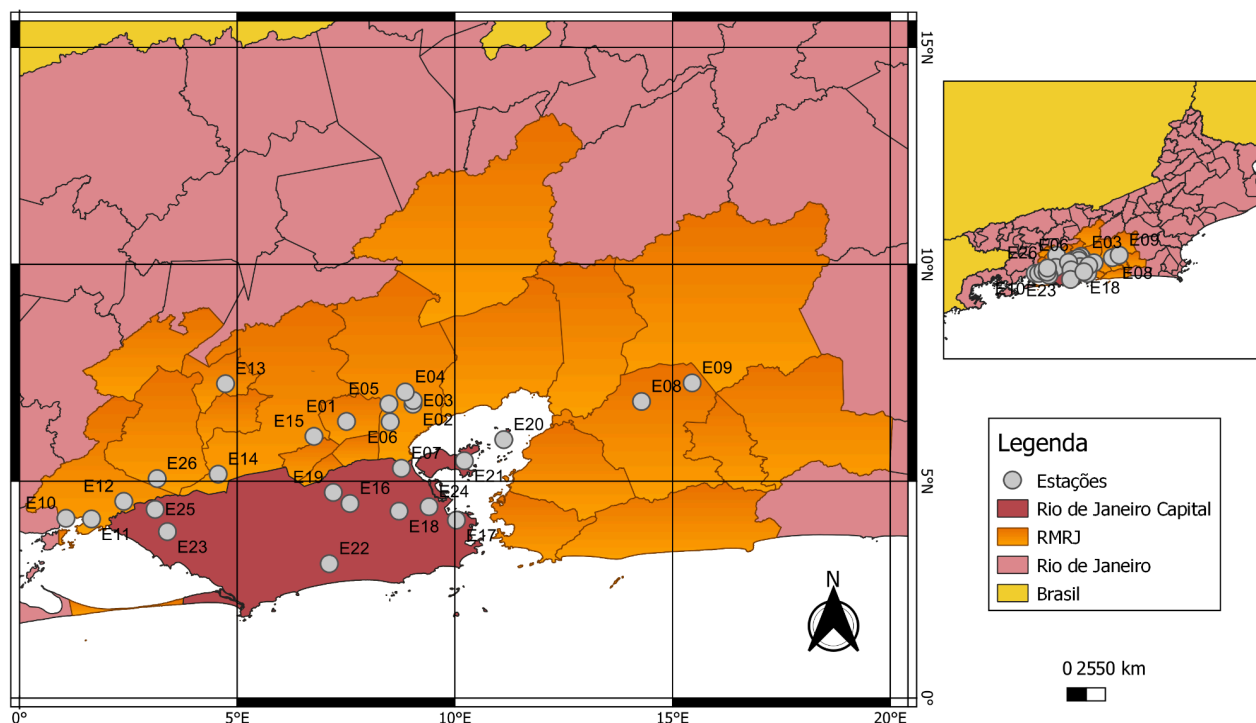


Figura 2 - Localização das estações de monitoramento da Qualidade do Ar usadas para análise em relação à RMRJ

Tabela 4: Estações de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e respectivos poluentes monitorados

Código da Estação	Nome	Período Analisado	Poluentes Analisados
E01	São Bernardo	2013-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , MP ₁₀
E02	Campos Elíseos	2004-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E03	Campos Eliseos (Antiga)	2002	NO ₂ , O ₃
E04	Jardim Primavera	2004-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E05	Pilar	2004-2023	NO ₂ , SO ₂ , MP ₁₀
E06	São Bento	2004-2023	NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E07	Vila São Luiz	2004-2022	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E08	Porto das Caixas	2009-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E09	Sambaetiba	2007-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀

E10	Coroa Grande	2013-2023	NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E11	Ilha Da Madeira	2014-2023	MP ₁₀
E12	Monte Serrat	2008-2023	NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP _{2,5} , MP ₁₀
E13	Engenheiro Pedreira	2001-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E14	Jardim Guandu	2014-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E15	Monteiro Lobato	1999-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E16	Campo dos Afonsos	2018-2023	O ₃
E17	Centro	2000-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E18	Engenhão	2013-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , MP ₁₀
E19	Gericinó	2018-2023	O ₃
E20	Ilha de Paquetá	2011-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀ .
E21	Ilha do Governador	2011-2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E22	Lab. INEA	2023	O ₃
E23	Largo do Bodegão	2009 - 2023	NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E24	Manguinhos	2017 - 2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP _{2,5} , MP ₁₀
E25	Adalgisa Nery	2009 - 2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀
E26	Piranema	2012 - 2023	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP _{2,5}

Destaca-se que existem limitações associadas à disponibilidade temporal e à distribuição espacial das estações, uma vez que nem todas apresentam séries completas para todo o período analisado. Essas limitações foram consideradas na seleção e tratamento dos dados.

Para a caracterização das emissões veiculares, foram utilizados dados secundários provenientes de bases oficiais. As informações sobre a frota foram obtidas a partir do Registro Nacional de Veículos Automotores (RENAVAM), disponibilizado pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) e sistematizado pelo IBGE.

3.3. Análises dos dados das estações de monitoramento

As análises possuem caráter observacional, estatístico e exploratório, permitindo avaliar a evolução temporal, a variabilidade espacial e os padrões de concentração dos poluentes. Inicialmente, foi realizado o tratamento e a validação dos dados, incluindo a remoção de inconsistências, registros inválidos, duplicados e outliers, bem como a identificação de lacunas temporais. A detecção de outliers foi realizada por meio do método

do intervalo interquartil (IQR), complementada por análise gráfica (boxplots) e inspeção visual das séries temporais.

Após o tratamento, foram calculadas médias horárias, diárias, mensais e anuais, conforme a métrica recomendada para cada poluente (WHO, 2021). Foram calculadas médias móveis de 8 horas para CO e O₃, médias diárias para SO₂, MP₁₀ e MP_{2,5}, além de valores máximos horários para NO₂. Para garantir a robustez das análises, foram consideradas apenas séries com, no mínimo, 75% de dados válidos após o tratamento.

As análises foram realizadas utilizando a linguagem Python, com o auxílio das bibliotecas pandas, numpy, matplotlib, seaborn, statsmodels, geopandas e pymannkendall. Foram elaboradas séries temporais, boxplots, histogramas e mapas de calor (heatmaps), permitindo identificar padrões sazonais, tendências temporais e variabilidade dos dados.

3.4. Avaliação da relação qualidade do ar e dados de emissões veiculares

De forma complementar, foi realizada uma análise das emissões veiculares na RMRJ, considerando a evolução da frota circulante e sua contribuição potencial para os níveis observados de poluição atmosférica. Ressalta-se que não foi possível reproduzir integralmente a metodologia original de estimativa de emissões aplicada em inventários oficiais, devido à ausência de dados primários necessários para o refinamento local das estimativas, tais como intensidade de uso real por categoria veicular e fatores de emissão medidos especificamente para a frota em circulação na RMRJ. Assim, esta etapa foi conduzida com base nos dados e parâmetros disponíveis no Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro (COPPETEC, 2011), elaborado como referência técnica para o estado.

Cabe destacar que o inventário possui abrangência estadual e apresenta resultados da série histórica estimados para o período de 1980 a 2010, além de projeções de emissões até 2030. Dessa forma, assumiu-se como premissa metodológica que o perfil tecnológico e emissor da frota do Estado do Rio de Janeiro seria representativo, em termos gerais, da dinâmica observada na RMRJ. Trata-se de uma premissa relevante, uma vez que podem existir diferenças espaciais intraestaduais; contudo, até o momento, este é o único inventário consolidado que disponibiliza série histórica estruturada e projeções futuras consistentes sob a mesma metodologia. Inventários mais recentes disponibilizados pelo INEA referem-se, em geral, a anos-base específicos ou atualizações pontuais, o que inviabiliza a construção de uma comparação temporal homogênea ao longo das diferentes fases do PROCONVE.

O inventário COPPETEC (2011) apresenta uma abordagem do tipo bottom-up, na qual as emissões são estimadas por meio da combinação entre frota circulante (Fr), intensidade de uso ajustada (IuAjust) e fator de emissão (Fe), conforme metodologia amplamente empregada em inventários nacionais e estaduais (MMA, 2010; COPPETEC, 2011). O documento reconstrói as emissões veiculares para o período histórico de 1980 a 2010, utilizando dados oficiais de frota disponíveis para os anos mais recentes da série e estimativas modeladas para anos anteriores, com base em séries históricas de crescimento da frota, participação por categoria veicular e evolução tecnológica associada às fases do PROCONVE. Além disso, o inventário apresenta cenários prospectivos com projeções de emissões até 2030, considerando tendências esperadas de renovação da frota e avanço regulatório.

Essa abordagem permitiu estimar a carga anual de emissões por poluente, categoria veicular, combustível e ano-calendário, a partir da desagregação das principais variáveis associadas ao setor de transportes. No entanto, deve-se considerar que, à medida que se retrocede no tempo ou se avança em projeções futuras, aumenta-se o grau de incerteza associado às estimativas, em função das premissas adotadas quanto à evolução tecnológica, padrões de uso e crescimento da frota.

Cabe destacar que os dados de emissões utilizados neste estudo não correspondem a medições diretas em campo, mas a estimativas baseadas em parâmetros oficiais de frota, consumo e fatores de emissão provenientes de literatura técnica, relatórios institucionais e bases públicas consolidadas. O inventário considera diferentes categorias veiculares, incluindo automóveis, veículos comerciais leves, motocicletas, ônibus e caminhões, bem como distintos tipos de combustível, como gasolina, etanol, diesel e gás natural veicular (GNV).

Neste trabalho, foi adotado o Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro (COPPETEC, 2011) como referência metodológica, em função de sua consistência temporal e ampla utilização em estudos técnicos. Foram utilizados os valores médios de emissões referentes ao ano-base de 2011, empregados como parâmetro para análises comparativas e interpretativas ao longo das diferentes fases do PROCONVE, e não como uma nova estimativa independente de emissões.

As emissões veiculares foram avaliadas em duas abordagens: (i) emissões absolutas, expressas em toneladas por ano (10^6 t/ano), representando a carga total anual atribuída à frota circulante; e (ii) emissões relativas, obtidas por normalização das emissões absolutas pela frota, expressas em toneladas por veículo por ano (t/veículo·ano), permitindo avaliar a

evolução do potencial emissor médio da frota ao longo das diferentes fases do PROCONVE. Para a normalização das emissões relativas, foram utilizados dados de frota provenientes de registros oficiais do DENATRAN para os anos mais recentes, complementados por informações históricas de frota presentes no próprio inventário para o período anterior.

A comparação entre emissões estimadas e concentrações atmosféricas medidas foi realizada considerando as fases regulatórias do PROCONVE (L3 a L7), utilizando como base as concentrações médias anuais medidas de CO, NO_x e MP. Esses poluentes foram selecionados por serem os únicos que apresentaram estimativas de emissão disponíveis e consistentes no inventário COPPETEC (2011), possibilitando a análise integrada entre emissões e qualidade do ar. Ressalta-se que, nesta etapa, o termo “MP” corresponde às frações MP₁₀ e MP_{2,5}, de acordo com os dados de monitoramento disponíveis e com a relevância sanitária desses contaminantes.

A análise foi conduzida com base em dados de duas estações de monitoramento localizadas em áreas representativas de elevada influência veicular e urbana: a estação E17 (Centro) e a estação E24 (Manguinhos). A escolha dessas estações se justifica por sua localização em áreas densamente urbanizadas, com intenso tráfego e elevada atividade antrópica, além da disponibilidade de séries históricas mais consistentes para os poluentes avaliados, o que trouxe maior robustez na comparação entre padrões observados de concentração e estimativas de emissões veiculares. Ressalta-se que a análise realizada a partir dessas estações não pretende representar a totalidade da RMRJ, mas fornecer um recorte interpretativo de áreas com elevada influência veicular e urbana, permitindo explorar a relação entre padrões observados de concentração e estimativas de emissões sob condições críticas de mobilidade.

Adicionalmente, considerou-se a representatividade das categorias veiculares na análise dos poluentes. O CO foi analisado prioritariamente em associação às emissões de veículos leves, por ser um poluente fortemente relacionado à combustão incompleta típica desse segmento. O material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}) foi avaliado junto às emissões de veículos pesados, dada a relevância das emissões associadas à queima de diesel e ao desgaste mecânico em frotas de transporte coletivo e de carga. Já o NO_x foi analisado considerando tanto veículos leves quanto pesados, uma vez que ambos contribuem de forma significativa para a emissão desse poluente e para a dinâmica atmosférica regional.

Dessa forma, buscou-se avaliar se a evolução tecnológica e regulatória associada às fases do PROCONVE apresenta correspondência com os padrões observados nas

concentrações médias anuais medidas na RMRJ, por meio de análises gráficas comparativas entre emissões absolutas e relativas e os valores monitorados nas estações selecionadas.

Ressalta-se que a análise apresentada possui caráter interpretativo e comparativo, não configurando uma validação estatística direta entre emissões estimadas e concentrações atmosféricas medidas. Isso ocorre porque as concentrações observadas nas estações de monitoramento refletem não apenas as emissões locais, mas também processos atmosféricos complexos, como transporte regional de poluentes, dispersão, deposição e transformações químicas, além da influência de variáveis meteorológicas (temperatura, radiação solar, vento e precipitação). Adicionalmente, as estimativas de emissões utilizadas neste estudo foram obtidas a partir de um inventário, o que impõe limitações quanto à representação de mudanças anuais mais detalhadas na frota e na intensidade de uso ao longo do tempo. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como uma aproximação do papel potencial do setor veicular na dinâmica observada da qualidade do ar na RMRJ, contribuindo para discussões sobre tendências, efetividade regulatória e necessidade de políticas públicas integradas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Variabilidade de longo período

As Figuras 3 a 8 apresentam a evolução temporal das concentrações médias anuais dos poluentes CO, O₃, NO₂, SO₂, MP₁₀ e MP_{2,5} na RMRJ entre os anos de 1998 e 2023. Destaca-se que as médias anuais apresentadas correspondem à média simples entre as estações com dados válidos em cada ano. Observa-se que, embora existam variações significativas nos valores máximos ao longo dos anos, com destaque para picos em anos específicos, visualmente, a tendência geral das médias anuais, para poluentes como CO e NO₂, é de diminuição. Para SO₂ e material particulado, essa tendência não se apresenta de forma tão uniforme, enquanto o O₃ não apresenta padrão claro de redução ao longo do período. Esses comportamentos são consistentes com estudos anteriores realizados em outras regiões metropolitanas do Brasil (Carvalho et al., 2015; Santos et al., 2016; Andrade et al., 2017).

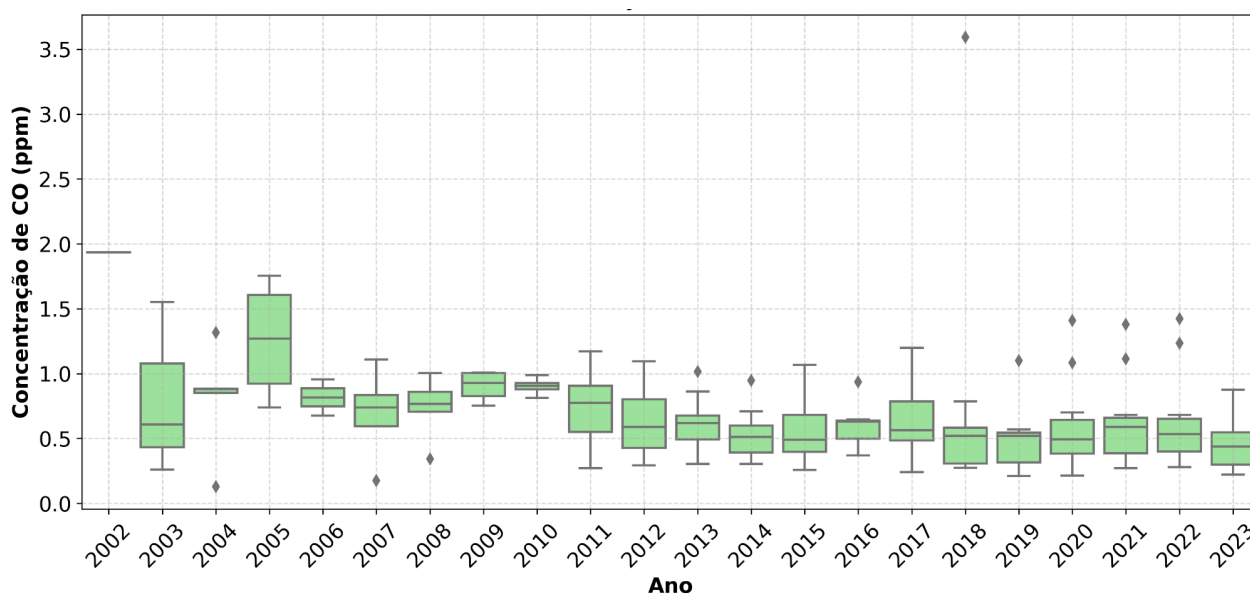


Figura 3 - Concentração média anual de CO, em PPM, nas estações da RMRJ, no período 2002-2023

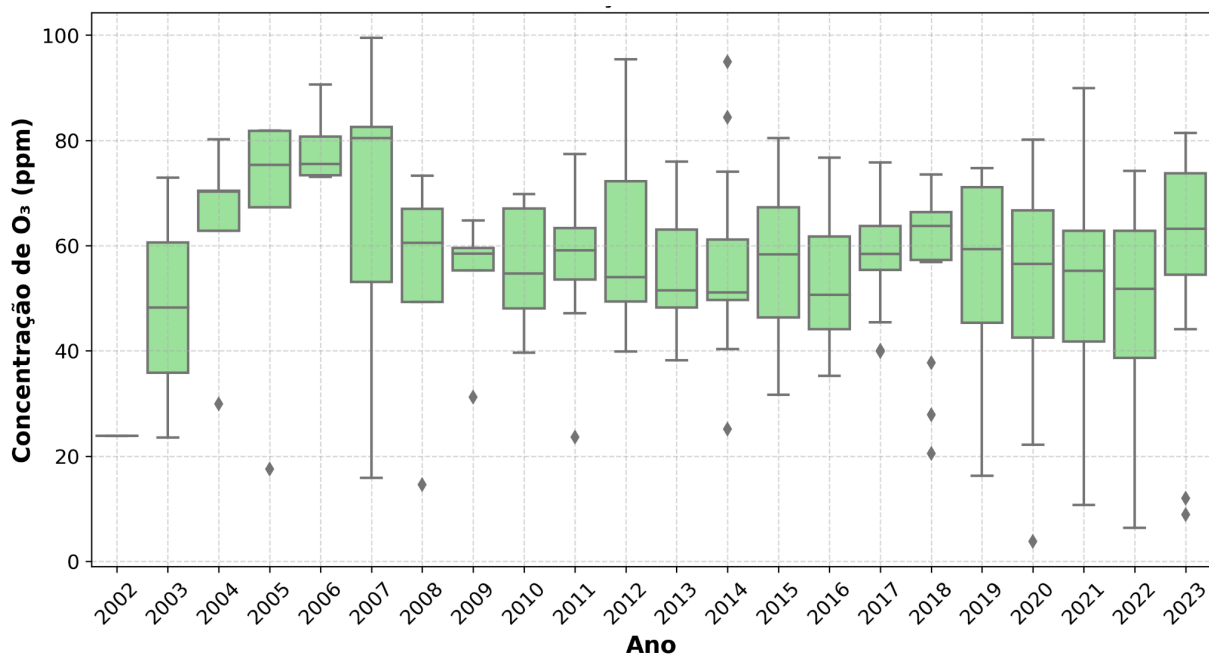


Figura 4 - Concentração média anual de O_3 , em PPM, nas estações da RMRJ, no período 2002–2023

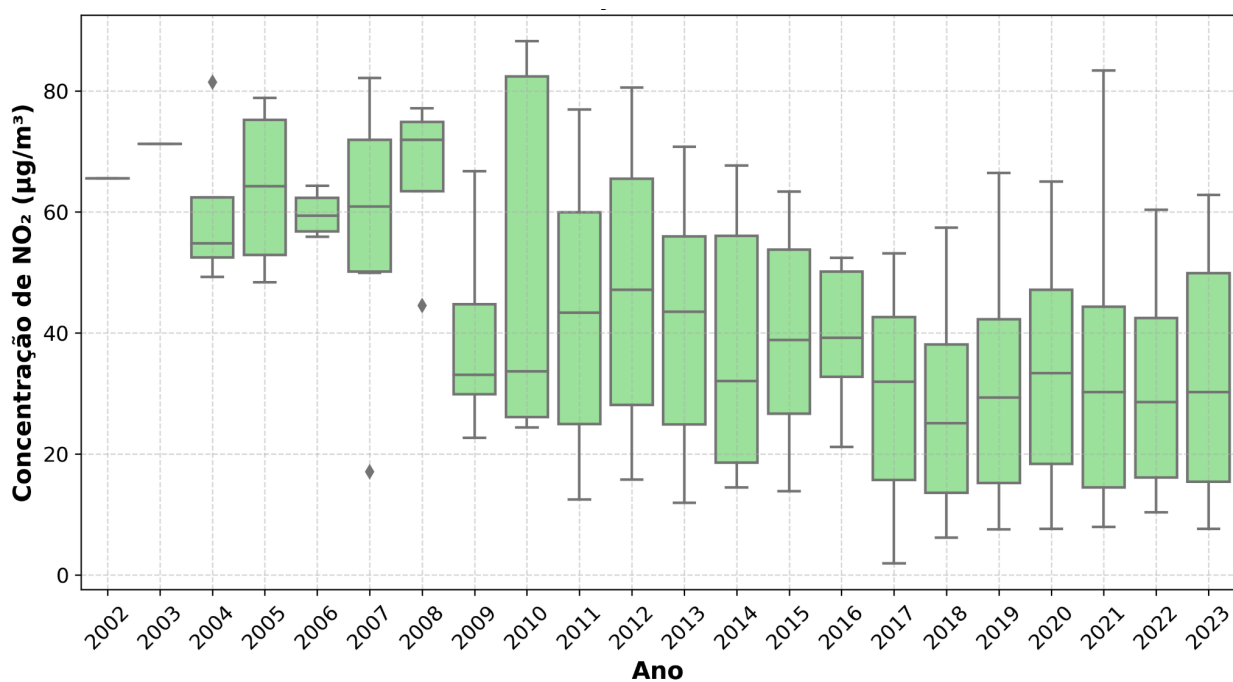


Figura 5 - Concentração média anual de NO_2 , em $\mu g/m^3$, nas estações da RMRJ, no período 2002–2023

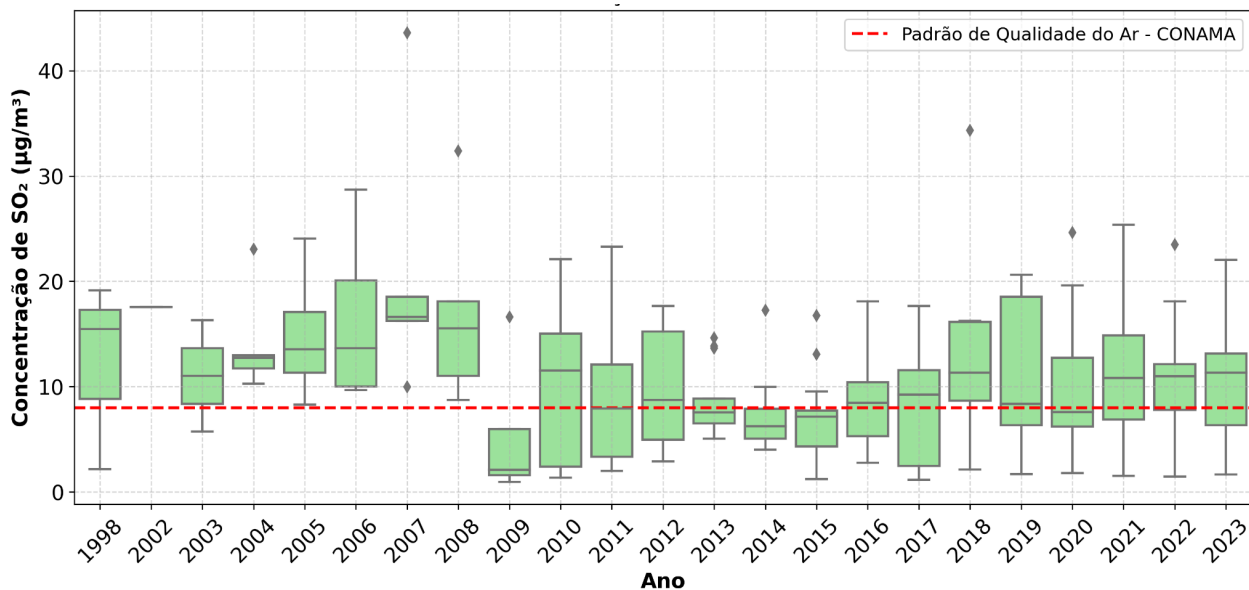


Figura 6 - Concentração média anual de SO_2 , em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, nas estações da RMRJ, no período 1998–2023

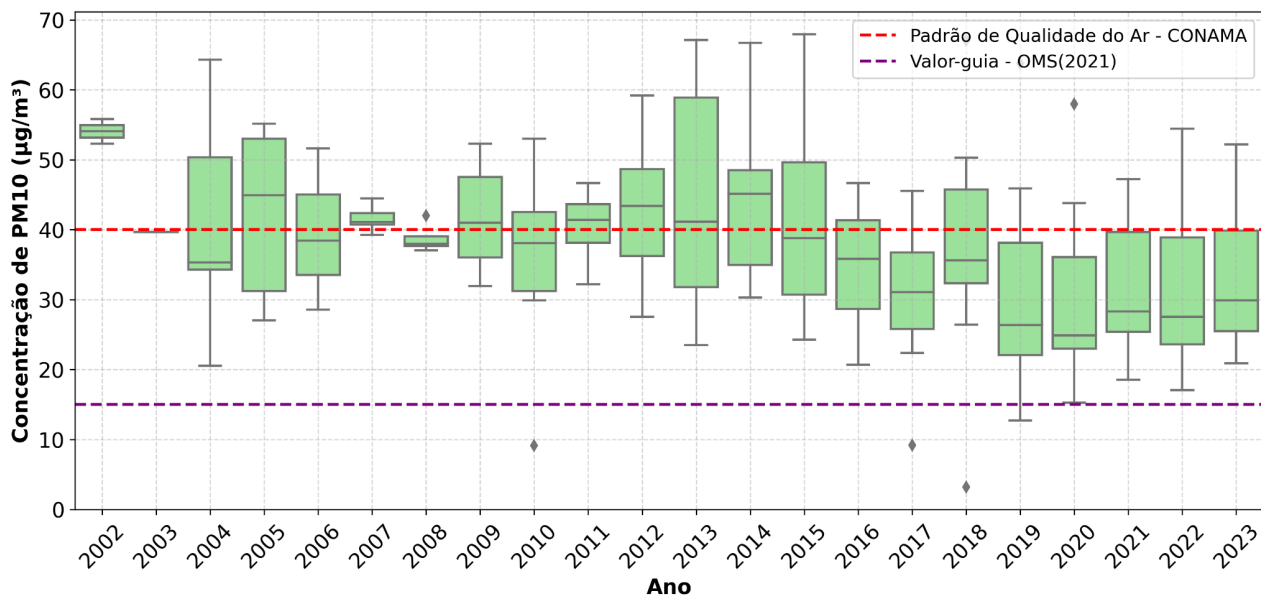


Figura 7 - Concentração média anual de MP_{10} , em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, nas estações da RMRJ, no período 2002–2023

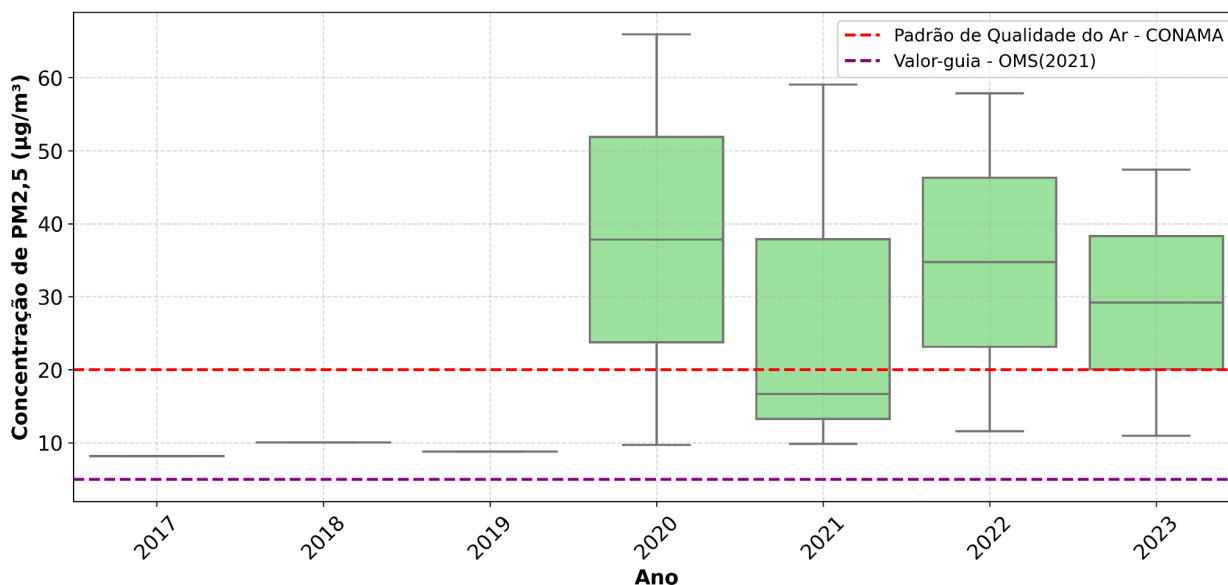


Figura 8 - Concentração média anual de MP_{2,5}, em µg/m³, nas estações da RMRJ, no período 2017–2023

O comportamento das concentrações de CO, por exemplo, mostra uma tendência geral de queda ao longo da série histórica. Em 2002, as concentrações médias estavam em torno de 1,9 ppm, reduzindo-se consistentemente até valores abaixo de 0,8 ppm a partir de 2015, o que corresponde a uma redução média de 57,9%. A tendência de redução observada é compatível com a implementação progressiva das fases do PROCONVE e melhorias na qualidade dos combustíveis. Entre as fases L4 (2007) e L6 (2014) para veículos leves, que, em geral, representam mais de 95% das emissões de CO em centros urbanos (CETESB, 2023), os limites máximos de emissão de CO foram reduzidos em aproximadamente 66%. Para veículos pesados, as fases P5 (2009) e P7 (2012) reduziram as emissões de CO em cerca de 50% (IBAMA, 2016). Andrade et al. (2017) relatam tendência semelhante em outras metrópoles brasileiras, como São Paulo, sugerindo efeito direto das políticas de controle veicular. Embora a associação temporal entre a redução das concentrações e a implementação das fases do PROCONVE seja consistente, não é possível atribuir causalidade direta, uma vez que as concentrações atmosféricas refletem a interação entre emissões, condições meteorológicas e transformações químicas na atmosfera.

Para o NO₂, a tendência de redução é ainda mais nítida, especialmente após 2012, coincidindo com a entrada em vigor da fase P7 do PROCONVE para veículos pesados, que introduziu tecnologias como SCR (Redução Catalítica Seletiva) e EGR (Recirculação dos Gases de Escape), resultando em reduções de até 60% nas emissões de NO_x (CETESB, 2023). Como os veículos pesados representam parcela significativa das emissões urbanas

desse poluente, cerca de 69% na RMRJ (INEA, 2022), a melhora observada pode estar associada à renovação da frota e ao controle mais rigoroso dessas emissões.

As concentrações de SO₂ também mostram uma queda expressiva a partir dos anos 2000, após alguns picos no início da série. Essa redução está diretamente relacionada à diminuição do teor de enxofre nos combustíveis: o diesel automotivo, por exemplo, passou de 2.000 ppm nos anos 1990 para 50 ppm em 2013 (diesel S-50) e, posteriormente, para 10 ppm com o diesel S-10 (ANP, 2024). Além disso, houve avanço no controle das emissões industriais e na fiscalização ambiental, conforme relatado por estudos da CETESB (2023).

O MP₁₀ apresenta tendência de queda mais acentuada a partir de 2015, embora ainda com valores máximos elevados em alguns anos. Essa melhora também está associada às fases mais recentes do PROCONVE, especialmente P7 e P8, que impuseram limites mais rígidos à emissão de material particulado por veículos pesados. Mesmo assim, ao comparar com os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 491/2018 (média anual de 40 µg/m³ para MP₁₀), observa-se que muitos anos ainda apresentaram médias acima do valor recomendado. Já em relação às diretrizes da WHO (WHO, 2021), que estabelecem valor-guia de 15 µg/m³ para MP₁₀, todos os anos excedem significativamente o limite proposto, evidenciando a necessidade de políticas de controle mais ambiciosas.

O MP_{2,5}, monitorado com regularidade apenas a partir de 2017, mostrou um pico expressivo em 2020, podendo refletir mudanças na dinâmica de mobilidade observadas durante o período da pandemia de COVID-19. Entre os fatores plausíveis para tentar explicar esse comportamento estão alterações nos padrões de circulação veicular, incluindo a manutenção ou até o aumento relativo do transporte de cargas em rodovias brasileiras. De acordo com reportagem da *Exame* (2021), o volume de cargas transportado por caminhões nas rodovias brasileiras registrou um incremento substancial em 2020, apesar das restrições associadas à pandemia. Essa informação sugere que segmentos como o transporte de cargas podem ter exercido influência sobre os níveis de emissão de material particulado fino naquele ano, embora dados específicos de atividade rodoviária permaneçam limitados para a RMRJ. Trata-se de uma hipótese interpretativa, uma vez que dados específicos de atividade veicular por categoria não estavam disponíveis para o período, o que limita a confirmação direta dessa dinâmica.

Mesmo com a posterior estabilização, os valores médios de MP_{2,5} ainda permanecem acima do padrão estabelecido pela Resolução CONAMA n.º 491/2018 (Brasil, 2018) (20 µg/m³) e consideravelmente superiores ao valor de referência recomendado pela WHO (WHO, 2021) (5 µg/m³). Esses achados ressaltam a urgência de estratégias específicas de

controle e monitoramento para esse poluente fino, cujos efeitos sobre a saúde humana são bem documentados na literatura.

Historicamente, o material particulado é um dos maiores desafios para a qualidade do ar no Rio de Janeiro, com estudos anteriores apontando níveis persistentemente elevados em comparação aos valores recomendados internacionalmente (Santos et al., 2016; Silveira e Carvalho, 2021). Essa situação decorre da combinação de fontes móveis intensivas, atividades portuárias e condições meteorológicas que favorecem a concentração desses poluentes, especialmente em regiões densamente urbanizadas. Justo et al. (2023) destacam que, mesmo após intervenções viárias e melhorias na frota durante os Jogos Olímpicos de 2016, as concentrações de MP continuaram a superar os limites de referência, reforçando o caráter crítico desse poluente na RMRJ. De acordo com Arbilla et al. (2022), embora os índices de qualidade do ar no Brasil sejam, em geral, classificados como ‘bons’ segundo os padrões nacionais, o valor-guia recomendado pela WHO (2021) é excedido em cerca de 50% dos dias em diversas áreas da RMRJ, evidenciando a necessidade de maiores investimentos para assegurar o direito à saúde e cidades mais sustentáveis alinhadas à Agenda 2030.

Por fim, o O_3 não apresenta uma tendência clara e uniforme ao longo da série histórica analisada, diferentemente dos poluentes primários. Em alguns períodos, como entre 2002 e 2007, observa-se um aumento das concentrações médias e dos valores máximos. Esse comportamento está associado à natureza secundária do ozônio, cuja formação depende da disponibilidade de precursores — como óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs) — e de condições meteorológicas favoráveis, especialmente elevada radiação solar e temperaturas mais altas (Seinfeld e Pandis, 2016). Ademais, a redução das emissões de NO, que atua como um importante “sumidouro” do O_3 , pode favorecer o acúmulo desse poluente em determinados contextos atmosféricos, sobretudo em dias quentes e ensolarados, fenômeno que ocorre de maneira espacialmente heterogênea. Sendo assim, esse comportamento evidencia que melhorias tecnológicas na frota não se traduzem automaticamente em reduções de poluentes secundários, cuja formação depende de processos fotoquímicos complexos e da disponibilidade de precursores atmosféricos.

Tendências semelhantes, caracterizadas por elevada variabilidade temporal e espacial nas concentrações de ozônio, também foram reportadas por Carvalho et al. (2015) e Carvalho et al. (2020) para a RMSP, evidenciando a forte dependência do O_3 em relação às condições meteorológicas e à dinâmica dos precursores em ambientes urbanos complexos. Em análise mais abrangente, Boari, Pedruzzi e Vieira-Filho (2023) avaliaram tendências anuais e sazonais de O_3 , $MP_{2,5}$ e MP_{10} em diferentes regiões altamente urbanizadas do Brasil,

incluindo Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte e Espírito Santo, no período entre o início da década de 1990 e 2019. Os autores identificaram comportamentos contrastantes entre as regiões analisadas, com predominância de tendências crescentes de O_3 em estações da RMSP e tendências majoritariamente decrescentes no Rio de Janeiro. O estudo também destaca que a legislação nacional vigente apresenta valores menos restritivos quando comparados às Diretrizes de Qualidade do Ar da WHO (WHO, 2021), resultando em frequentes episódios de excedência, além de ressaltar a necessidade de ampliação e fortalecimento da rede de monitoramento da qualidade do ar no país.

As Figuras 9 a 14 apresentam o número de dias por ano em que as concentrações dos poluentes CO , O_3 , NO_2 , SO_2 , MP_{10} e $MP_{2,5}$ ultrapassaram os padrões nacionais de qualidade do ar de curto prazo, conforme definidos pela Resolução CONAMA n.º 491, de 19 de novembro de 2018 (BRASIL, 2018), que entrou em vigor na data de sua publicação e revogou a Resolução CONAMA n.º 03/1990. A referida resolução estabeleceu novos padrões nacionais de qualidade do ar estruturados em fases intermediárias progressivas (PI-1, PI-2 e PI-3) até o padrão final, com o objetivo de promover a convergência gradual aos valores recomendados internacionalmente. Essas fases representam níveis sucessivamente mais restritivos de concentração, sendo implementadas de forma gradual no país, à medida que os órgãos ambientais avançam na gestão e no controle da poluição atmosférica.

Nesta análise, foram considerados os valores correspondentes à fase intermediária 2 (PI-2), por representar um nível intermediário de exigência regulatória atualmente adotado em diversos estudos e aplicações institucionais no Brasil, além de permitir uma avaliação mais realista do cumprimento dos padrões de qualidade do ar no contexto nacional, evitando tanto a subestimação das excedências (caso fossem utilizados padrões mais permissivos) quanto uma avaliação excessivamente restritiva frente às condições atuais de monitoramento. Para cada poluente, foram comparados os valores diários (ou o maior valor diário da média móvel de 8 horas, no caso de CO e O_3) com os respectivos limites estabelecidos na legislação vigente, permitindo quantificar a frequência anual de excedências por estação de monitoramento.

Assim, utilizaram-se como valores de referência: 9 ppm para CO (máximo diário da média móvel de 8 horas), $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para O_3 (máximo diário da média móvel de 8 horas), $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para NO_2 (média horária), $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para SO_2 (média de 24 horas), $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} (média de 24 horas) e $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $MP_{2,5}$ (média de 24 horas). A escolha desses limites se justifica por representarem os valores efetivamente utilizados pelos órgãos

ambientais brasileiros para fins de fiscalização, gestão e planejamento durante grande parte da série histórica avaliada.

As figuras 9 a 14 são apresentadas na forma de mapas de calor (heatmaps), nos quais as cores representam o número de dias por ano em que as concentrações excederam os limites estabelecidos, enquanto as células em cinza indicam ausência de dados válidos para o respectivo poluente, estação e ano. A presença dessas lacunas evidencia descontinuidades no monitoramento da qualidade do ar, que comprometem a análise temporal contínua e dificultam a avaliação completa do atendimento aos padrões ao longo da série histórica.

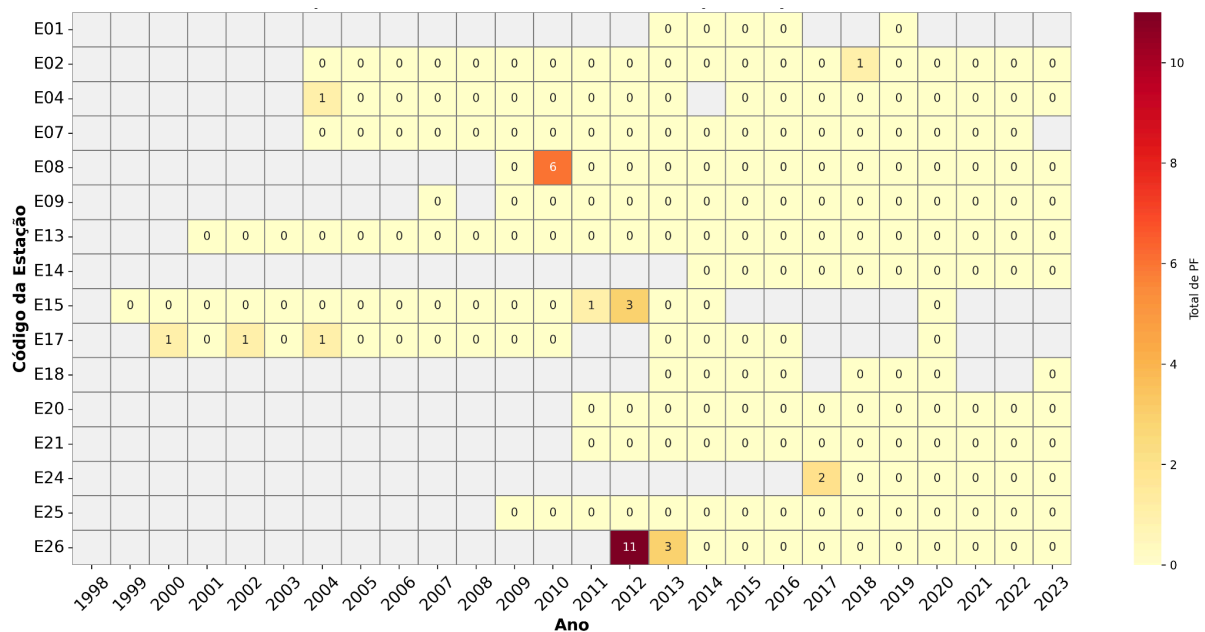


Figura 9 – Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de CO acima do padrão PI-2 (média móvel de 8 horas superior a 9 ppm), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018

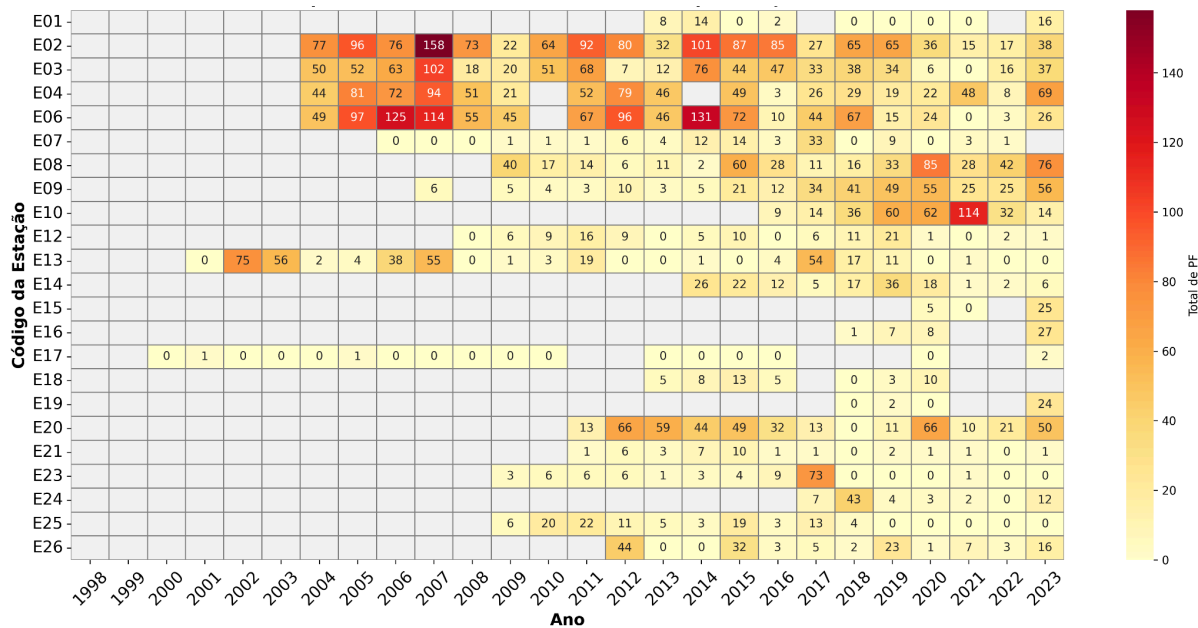


Figura 10 – Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de O₃ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo (PI-2 = 130 µg/m³, máximo diário da média móvel de 8 horas), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018

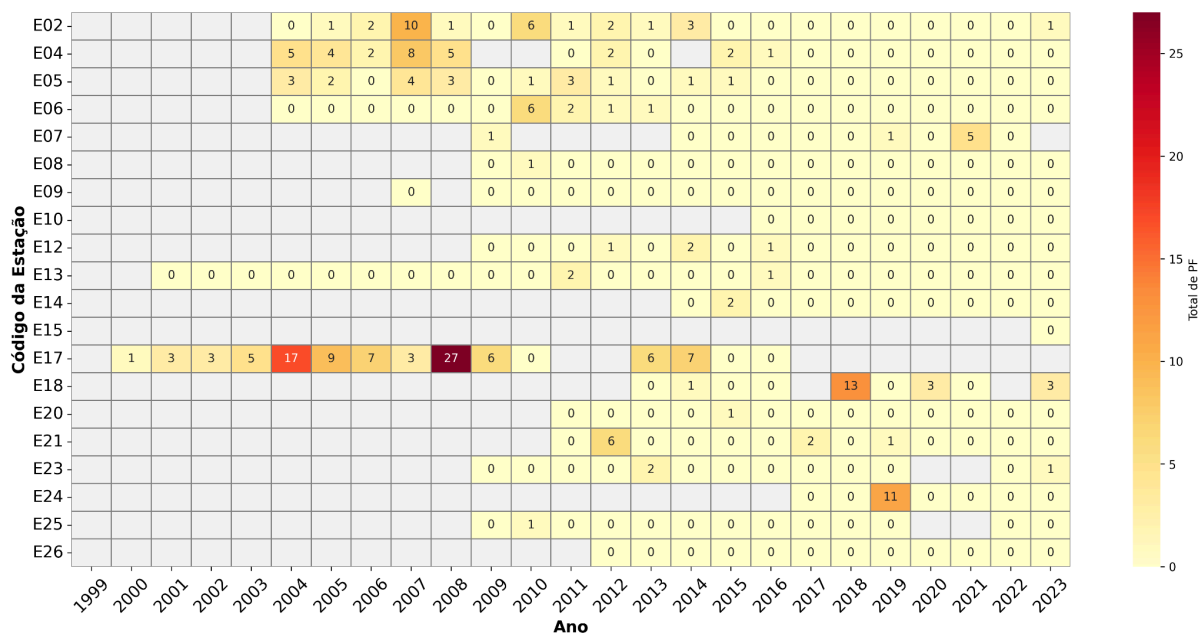


Figura 11 – Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de NO₂ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo (PI-2 = 240 µg/m³, média horária), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018

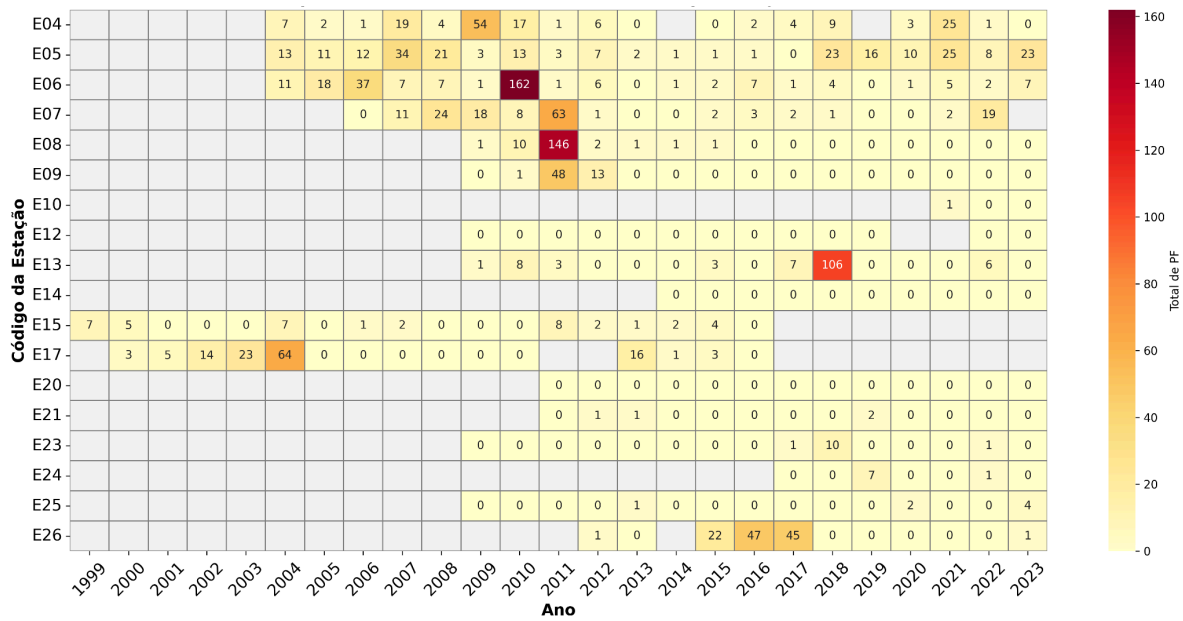


Figura 12 – Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de SO₂ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo (PI-2 = 50 µg/m³, média de 24 horas), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018

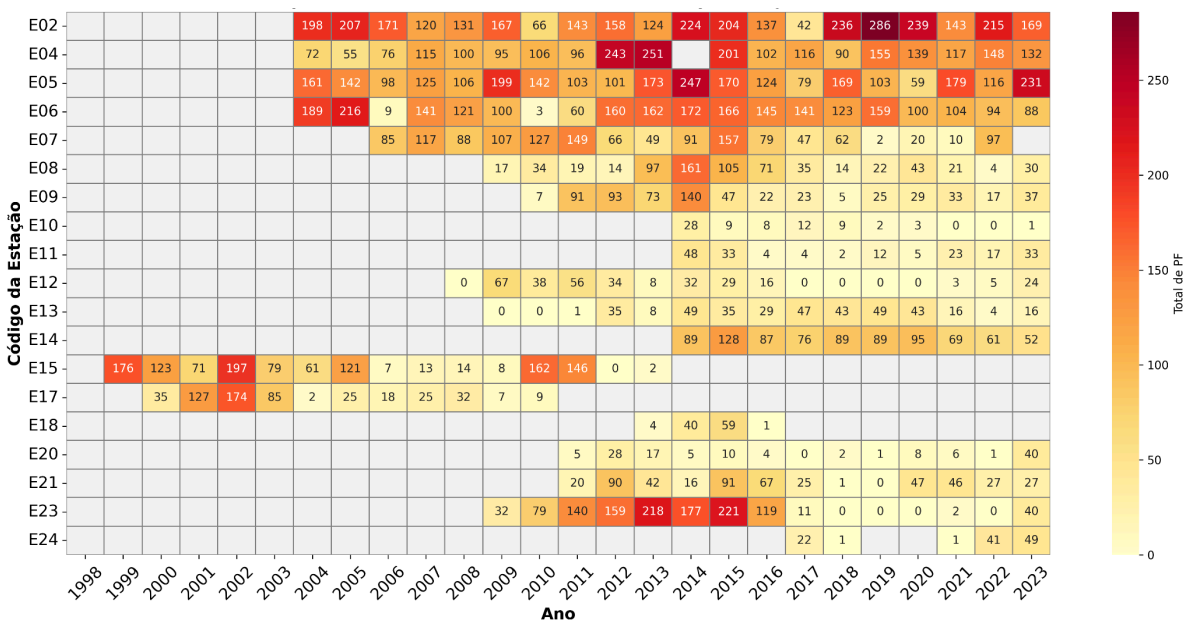


Figura 13 – Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de MP₁₀ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo (PI-2 = 100 µg/m³, média de 24 horas), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018

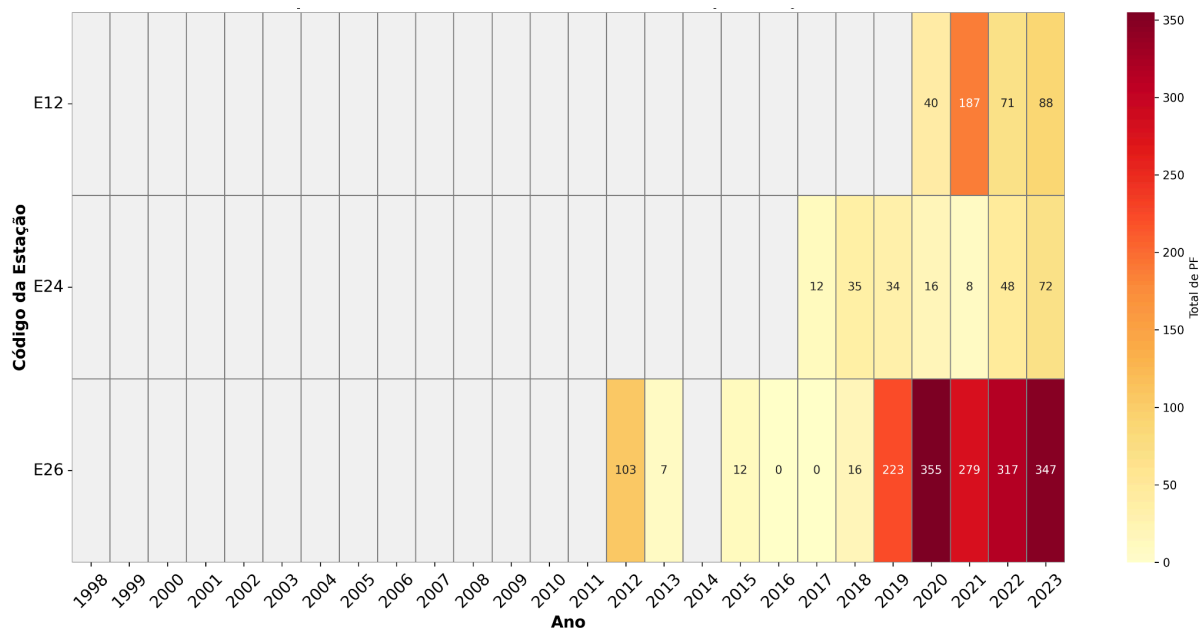


Figura 14 – Heatmap do número de dias por ano e por estação de monitoramento com concentrações de $MP_{2,5}$ acima do padrão de qualidade do ar de curto prazo ($PI-2 = 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, média de 24 horas), conforme Resolução CONAMA n.º 491/2018

A análise indica mudanças na frequência de excedências para CO , NO_2 e SO_2 ao longo da série histórica, com comportamentos distintos entre os poluentes e entre as estações de monitoramento. Para o CO , as ultrapassagens ao limite são pouco frequentes e concentram-se principalmente nos primeiros anos da série, com destaque para a estação E17 (Centro), localizada nas proximidades da Avenida Presidente Vargas, caracterizada por intenso tráfego veicular. Nos anos mais recentes, as excedências permanecem pouco frequentes, sem evidência de tendência clara de aumento.

No caso do NO_2 , observa-se maior frequência de excedências entre os anos de 2003 e 2007, seguida por redução e ocorrência de episódios mais esparsos a partir de 2010. No entanto, esse comportamento não é homogêneo entre as estações, sendo observados aumentos pontuais de excedências em períodos mais recentes em algumas localidades. Dessa forma, os padrões de NO_2 refletem elevada variabilidade espacial e temporal, não sendo possível caracterizar uma tendência uniforme de redução.

Para o SO_2 , as excedências foram mais frequentes antes de 2010, concentradas em algumas estações específicas, mantendo-se, de modo geral, pouco frequentes ao longo da série histórica. Ressalta-se que, antes da Resolução CONAMA n.º 491/2018, os padrões nacionais para esse poluente eram mais permissivos — por exemplo, o limite diário estabelecido pela Resolução CONAMA n.º 03/1990 era de $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto o valor

correspondente à fase intermediária 2 (PI-2) da Resolução CONAMA n.º 491/2018 é de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ — o que dificultava a identificação de episódios de pior qualidade do ar sob critérios mais restritivos. A redução observada a partir dos anos mais recentes pode estar associada, entre outros fatores, à diminuição do teor de enxofre nos combustíveis e ao fortalecimento de políticas de controle de emissões, como o PROCONVE e o PROMOT (IEMA, 2013; CETESB, 2023).

De forma geral, os resultados indicam que a frequência de excedências varia ao longo do tempo e entre os poluentes analisados, sendo influenciada por múltiplos fatores, incluindo características locais das estações, condições meteorológicas e mudanças nas fontes emissoras. Assim, as tendências observadas devem ser interpretadas com cautela, não sendo possível estabelecer relações causais diretas com políticas específicas de controle de emissões.

O comportamento observado para o material particulado difere daquele identificado para parte dos poluentes primários, evidenciando um quadro mais crítico. O MP_{10} apresenta elevada frequência de excedências ao padrão diário em diversas estações e anos, frequentemente ultrapassando uma centena de dias por ano, o que indica exposição recorrente da população. Esses resultados refletem a influência combinada de emissões veiculares, atividades industriais e ressuspensão de poeira urbana, fatores reconhecidamente relevantes na RMRJ (Justo et al., 2023). O $\text{MP}_{2,5}$, monitorado de forma mais sistemática a partir de 2012, apresenta um cenário particularmente preocupante. Algumas estações, como a E26, registram mais de 300 dias por ano acima do padrão diário, o que corresponde a mais de 80% dos dias do ano, evidenciando a persistência de condições potencialmente prejudiciais à saúde humana mesmo após avanços regulatórios.

No caso do ozônio troposférico (O_3), observa-se elevada frequência de excedências ao padrão de 8 horas ao longo de toda a série histórica, especialmente em estações localizadas em áreas urbanizadas e periurbanas. Esse comportamento reflete a natureza secundária do poluente e a complexidade de seu controle, fortemente dependente de condições meteorológicas, da disponibilidade de precursores e da dinâmica urbana, não apresentando tendência clara de redução ao longo do período analisado.

A análise espacial das estações de monitoramento indica que aquelas com maior frequência de excedências aos padrões de qualidade do ar concentram-se no município de Duque de Caxias, na Baixada Fluminense. Destacam-se, nesse contexto, as estações E01 (São Bernardo), E02 e E03 (Campos Elíseos), E04 (Jardim Primavera), E05 (Pilar) e E06 (São Bento), localizadas em áreas caracterizadas por elevada densidade populacional, intenso

fluxo veicular, proximidade a importantes eixos rodoviários e forte influência de atividades industriais.

A proximidade espacial dessas estações e a recorrência de padrões semelhantes de excedências aos padrões de qualidade do ar, especialmente para O_3 , MP_{10} e $MP_{2,5}$, permitem caracterizar esse conjunto territorial como uma zona crítica de degradação da qualidade do ar na RMRJ. Trata-se de uma área que, além da pressão ambiental associada à dinâmica industrial e logística, apresenta importantes desafios socioeconômicos. Duque de Caxias integra a Baixada Fluminense, região historicamente marcada por desigualdades estruturais relacionadas ao acesso à infraestrutura urbana, saneamento básico, serviços públicos e condições ambientais adequadas.

Dados do Censo Demográfico 2022, realizado pelo IBGE, indicam que o município de Duque de Caxias possuía uma população de 808.161 habitantes, figurando entre os mais populosos do estado do Rio de Janeiro. A elevada densidade populacional, associada a desigualdades socioeconômicas ainda presentes na região, amplia a relevância da exposição ambiental a poluentes atmosféricos, uma vez que parcelas significativas da população residem em áreas próximas a eixos rodoviários, polos industriais e zonas de intensa atividade logística (IBGE, 2022).

Essa sobreposição entre maior exposição a poluentes atmosféricos e condições socioeconômicas mais vulneráveis reforça a dimensão socioambiental da qualidade do ar, indicando que os riscos à saúde tendem a afetar de forma desproporcional populações em contextos urbanos mais frágeis. Esse padrão é discutido na literatura sob o conceito de injustiça ambiental ou racismo ambiental, que descreve a distribuição desigual dos impactos ambientais sobre grupos socialmente vulneráveis. Embora a presente análise não tenha incorporado variáveis socioeconômicas detalhadas, os resultados obtidos sugerem a relevância desse debate como aprofundamento futuro, especialmente no contexto da RMRJ, onde fatores territoriais, econômicos e sociais interagem na definição da exposição ambiental. Dessa forma, os episódios recorrentes de excedência não se configuram como eventos isolados, mas como expressão de condicionantes estruturais da ocupação territorial e da dinâmica de emissões locais, reforçando a necessidade de políticas públicas integradas que considerem simultaneamente aspectos ambientais, sociais e territoriais, conforme princípios defendidos pela WHO (WHO, 2021).

4.2. Variabilidade Sazonal e Horária

A análise da Figura 15 revela padrões sazonais distintos e relevantes para a compreensão da variabilidade da qualidade do ar ao longo do ano. Os poluentes primários, CO, NO₂, SO₂ e MP₁₀, apresentam maiores concentrações no inverno (junho-agosto), período marcado por condições atmosféricas menos favoráveis à dispersão de poluentes. Durante essa estação, a ocorrência de inversões térmicas em camadas próximas à superfície e a redução da altura da camada de mistura atmosférica limitam o transporte vertical, favorecendo o acúmulo de poluentes na baixa atmosfera (Carvalho et al., 2015; Santos et al., 2016). Além disso, as menores temperaturas podem reduzir a eficiência da combustão em veículos, contribuindo para emissões mais elevadas, enquanto a baixa precipitação, típica do período seco na região, diminui a remoção úmida desses compostos (CETESB, 2023).

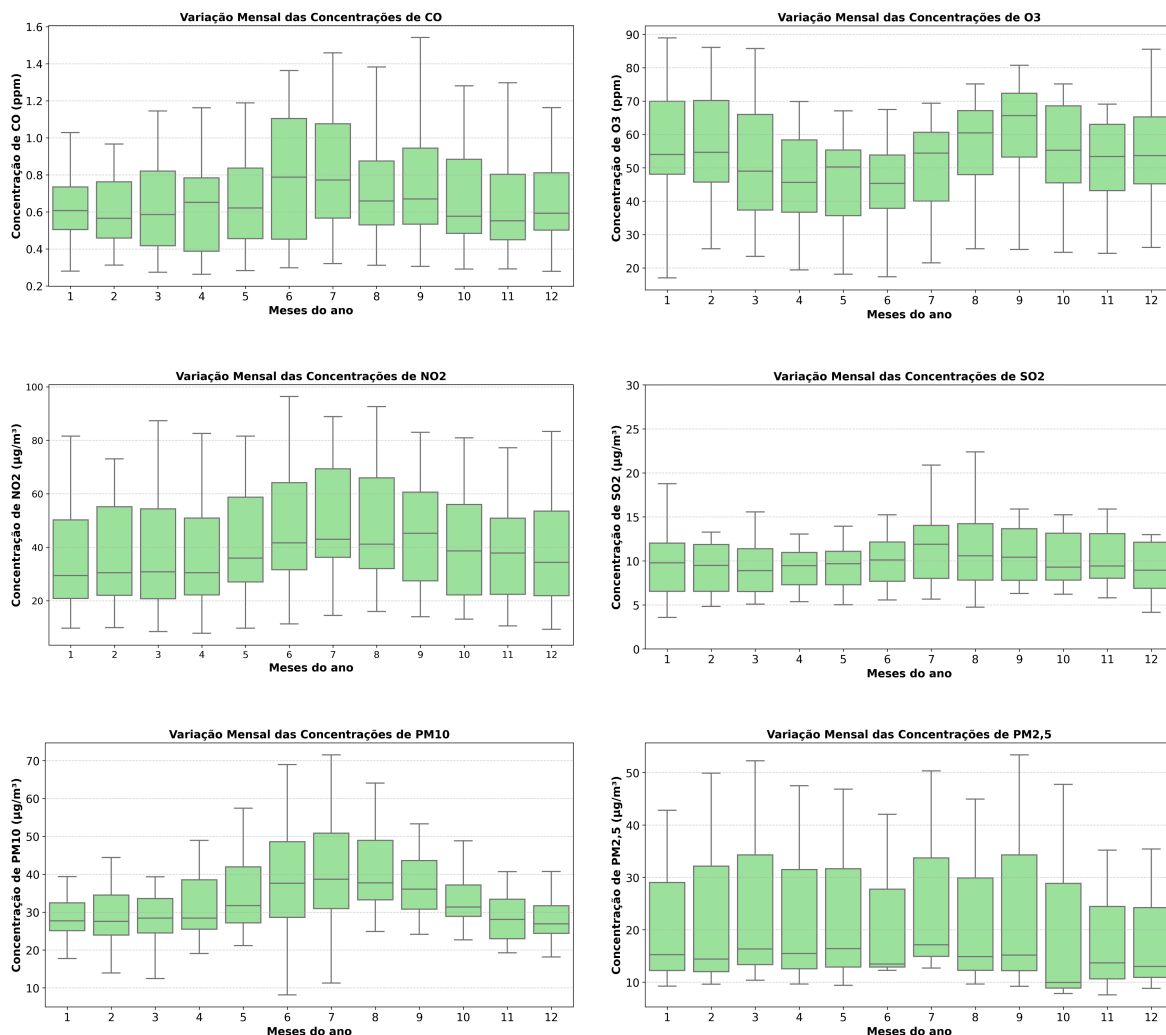


Figura 15 - Distribuição mensal dos poluentes atmosféricos na RMRJ

Em contraste, o O_3 apresenta comportamento inverso. As concentrações mais elevadas ocorrem nos meses de primavera e verão, com destaque para o período de setembro a dezembro, em razão da maior disponibilidade de radiação solar e das temperaturas elevadas, que intensificam as reações fotoquímicas responsáveis pela formação deste poluente secundário (Seinfeld e Pandis, 2016; Carvalho et al., 2020). Além disso, a maior frequência de massas de ar seco e estável durante esses meses favorece a permanência dos precursores (NO_x e COV), ampliando a formação de ozônio troposférico (Carvalho et al., 2020).

De forma geral, os resultados evidenciam um padrão sazonal característico, amplamente documentado na literatura para ambientes urbanos, no qual os meses mais secos e frios favorecem o acúmulo de poluentes primários, enquanto os meses mais quentes e ensolarados favorecem a formação de O_3 . Esse comportamento reflete a forte influência das condições meteorológicas sobre a dinâmica dos poluentes atmosféricos e está associado a processos físicos e químicos bem estabelecidos, como a redução da dispersão atmosférica no inverno e o aumento das reações fotoquímicas no verão. Padrões semelhantes já foram observados em outras regiões metropolitanas brasileiras, como a Região Metropolitana de São Paulo, bem como em estudos realizados na própria RMRJ (Carvalho et al., 2015; Carvalho et al., 2020; Santos et al., 2016).

Nesse contexto, os resultados obtidos neste estudo não apenas confirmam o comportamento sazonal esperado, mas também reforçam a relevância da variabilidade meteorológica na modulação da qualidade do ar. Tais evidências destacam a importância de considerar a sazonalidade no planejamento e na gestão da qualidade do ar, indicando a necessidade de estratégias diferenciadas ao longo do ano para mitigar os impactos da poluição atmosférica sobre a saúde da população (WHO, 2021; Seinfeld e Pandis, 2016).

A análise da concentração horária média dos poluentes atmosféricos por dia da semana, representada na Figura 16, revela padrões consistentes e informativos sobre a dinâmica das emissões na região estudada. Observa-se que os gráficos de CO, NO_2 e MP_{10} apresentam um padrão bimodal nos dias úteis, com elevações expressivas nos períodos de maior fluxo veicular, entre 6h e 9h e entre 17h e 20h. No período da manhã, verifica-se uma leve defasagem entre os picos de concentração, com o CO atingindo valores máximos por volta das 8h, enquanto o NO_2 apresenta pico aproximadamente às 9h. Essa diferença pode estar associada aos processos de transformação química na atmosfera, uma vez que o NO_2 é parcialmente formado a partir da oxidação do NO emitido diretamente pelos veículos, o que pode gerar um pequeno atraso em relação ao CO, que é emitido diretamente.

Aos sábados, observa-se uma redução na intensidade dos picos de concentração, enquanto aos domingos as quedas tornam-se mais acentuadas, refletindo a diminuição da atividade veicular na RMRJ. Em relação aos dias úteis, as concentrações médias de CO apresentaram reduções da ordem de aproximadamente 8% aos sábados e 14% aos domingos, enquanto para o NO₂ as reduções foram de cerca de 17% e 30%, respectivamente. Esses resultados são coerentes com os encontrados por Carvalho et al. (2015), que identificaram reduções médias de 11% (sábados) e 24% (domingos) para o CO, e de 22% e 42% para o NO₂, no período de 1996 a 2009. Embora as magnitudes observadas neste estudo sejam ligeiramente inferiores, a concordância no padrão de redução reforça a forte influência da dinâmica semanal do tráfego veicular sobre as concentrações desses poluentes primários.

O comportamento observado para CO e NO₂ reflete diretamente o padrão de tráfego de veículos, com aumentos acentuados durante os horários de pico nos dias úteis. Ambos são poluentes diretamente associados às emissões veiculares, especialmente de veículos do ciclo Otto — isto é, veículos leves movidos predominantemente a gasolina, etanol ou flex —, que constituem a maior parte da frota urbana e são importantes emissores desses poluentes. Estudos como o de Miyajan e Desai (2015) demonstram uma correlação clara entre o aumento da movimentação de veículos e a elevação das concentrações desses poluentes em áreas urbanas com tráfego intenso, com picos coincidentes com os períodos de maior fluxo.

Esse comportamento, caracterizado por picos associados aos horários de maior mobilidade urbana, também é observado na RMRJ e encontra respaldo nos inventários de emissões atmosféricas do Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2016) e no Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro, elaborado pela COPPETEC (2011). Esses estudos indicam a predominância dos veículos leves do ciclo Otto como principais contribuintes das emissões de monóxido de carbono. Ademais, ao se considerar o setor de transportes, o modo rodoviário se destaca como principal emissor, respondendo por cerca de 90% das emissões de CO₂ em 2007, o que evidencia a centralidade da mobilidade rodoviária tanto na dinâmica da poluição atmosférica local quanto nas emissões de gases de efeito estufa.

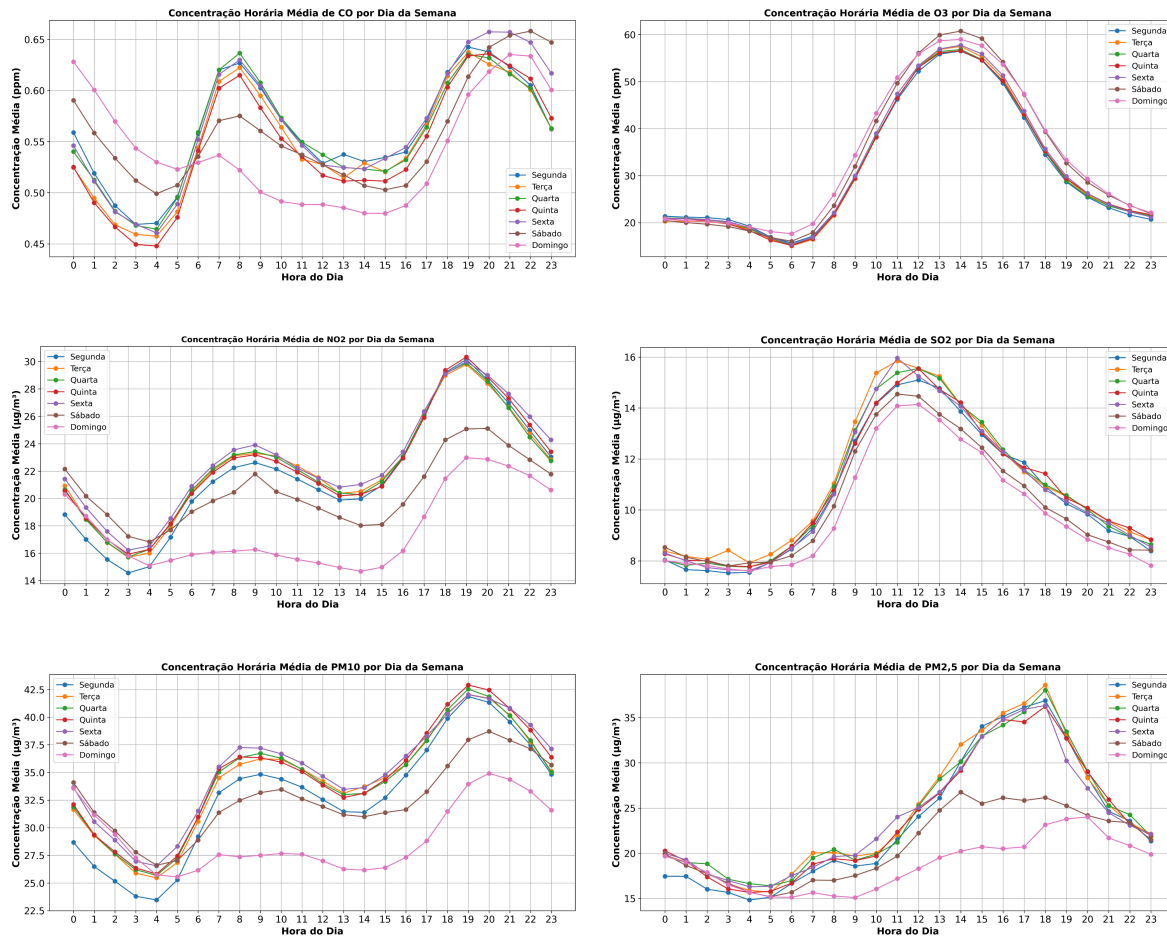


Figura 16 - Variação horária das concentrações de poluentes atmosféricos ao longo dos dias da semana na RMRJ

O gráfico do O₃ apresenta comportamento distinto, com pico de concentração entre 12h e 15h, relativamente constante ao longo dos dias da semana. Tal padrão está relacionado à sua formação secundária, que depende da presença de precursores (NO_x e COVs) e da intensidade da radiação solar. A elevação das concentrações nas horas mais quentes do dia corrobora a explicação desse processo fotoquímico (Seinfeld e Pandis, 2016). Além disso, observa-se que o O₃ tende a apresentar concentrações ligeiramente mais elevadas nos finais de semana, comportamento associado à redução das emissões de NO, que atua como agente consumidor do ozônio nas primeiras horas do dia (Carvalho et al., 2020).

As concentrações ao longo das horas do dia de SO₂ apresentam menor variabilidade ao longo do dia e da semana, com leve aumento no período diurno e declínio ao anoitecer. Esse comportamento sugere a predominância de fontes pontuais e mais contínuas, como atividades industriais e uso de combustíveis com enxofre, que não apresentam variações tão marcadas entre dias úteis e finais de semana quanto às emissões veiculares. Isso contribui

para um perfil temporal mais uniforme quando comparado aos poluentes associados ao tráfego. Destaca-se, ainda, que o NO_2 apresenta concentrações relativamente elevadas no período noturno, mesmo após a redução do fluxo veicular. Esse comportamento sugere que, além das emissões diretas, processos químicos atmosféricos também desempenham papel relevante na sua dinâmica ao longo do dia. Durante a noite, a menor incidência de radiação solar reduz a fotólise do NO_2 , favorecendo sua acumulação na atmosfera. Adicionalmente, reações envolvendo compostos nitrogenados, como a oxidação do NO e a formação de espécies intermediárias, como o N_2O_5 , podem contribuir para a manutenção ou elevação das concentrações de NO_2 em períodos noturnos. Esse padrão evidencia a complexidade da dinâmica do NO_x na atmosfera urbana, que não depende exclusivamente das emissões diretas, mas também de processos químicos e das condições meteorológicas locais.

O MP_{10} apresenta comportamento semelhante ao observado para CO e NO_2 , com elevação nos horários de maior fluxo veicular e redução ao longo da noite, além de menores concentrações aos finais de semana. Esse padrão reforça a influência das atividades urbanas e do tráfego, além da ressuspensão de partículas devido ao movimento dos veículos. Já o $\text{MP}_{2,5}$ apresenta menor variação ao longo do dia e não evidencia de forma clara o padrão bimodal observado para os demais poluentes, indicando maior influência de fontes contínuas, como processos de combustão e formação secundária.

De forma integrada, os resultados indicam a forte influência das atividades veiculares na modulação das concentrações de CO , NO_2 e MP_{10} , evidenciada pelos picos horários coincidentes com os períodos de maior fluxo e pela redução significativa nos finais de semana. Em contraste, poluentes associados a fontes mais contínuas, como o SO_2 e, em parte, o $\text{MP}_{2,5}$, apresentam menor variabilidade semanal, refletindo padrões de emissão menos dependentes da dinâmica do tráfego. Assim, a análise conjunta dos perfis temporais contribui para a compreensão das diferentes fontes emissoras e de seus comportamentos ao longo do tempo, reforçando a importância de estratégias diferenciadas de controle da poluição atmosférica.

4.3. Eventos Extremos de O_3 , MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$

A análise sazonal dos valores extremos de concentração dos principais poluentes atmosféricos, representados pelo percentil 90 (P90), evidencia padrões distintos associados não apenas à variabilidade meteorológica, mas também à ocorrência de episódios críticos de poluição na RMRJ (Figura 17). Diferentemente da análise das médias (Figura 15), que reflete

o comportamento típico das concentrações ao longo do ano, o P90 permite destacar condições mais severas de exposição, evidenciando períodos de maior risco à saúde da população.

O CO apresenta seus valores mais elevados no inverno, comportamento associado à maior estabilidade atmosférica, ocorrência de inversões térmicas e redução da altura da camada de mistura, condições típicas desta estação que dificultam a dispersão vertical dos poluentes. Para o NO₂, observa-se comportamento semelhante, com valores máximos concentrados no inverno e na primavera. Esse padrão reflete tanto a influência das condições atmosféricas desfavoráveis à dispersão quanto a persistência de emissões veiculares, além de possíveis processos fotoquímicos que favorecem a formação secundária de NO₂ em períodos de maior radiação solar na primavera. Estudos em outras regiões metropolitanas brasileiras, como na RMSP, também indicam maior frequência de episódios críticos de NO₂ em períodos de menor dispersão atmosférica (Carvalho et al., 2015; CETESB, 2023).

O material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}) também apresenta concentrações extremas mais elevadas no inverno, reforçando o papel das condições meteorológicas restritivas na intensificação de episódios críticos. Além da menor dispersão atmosférica, fatores como a redução da precipitação, o aumento da ressuspensão de poeira e a contribuição de fontes locais intensificam esses eventos. Estudos conduzidos em regiões urbanas brasileiras apontam comportamento semelhante, com maior frequência de episódios críticos de material particulado durante o período seco (Krecl et al., 2024; Andrade et al., 2017).

O comportamento do O₃ contrasta com o dos poluentes primários, apresentando seus maiores valores de P90 na primavera e no verão. Esse padrão está diretamente associado à sua formação fotoquímica, intensificada pela maior incidência de radiação solar e temperaturas elevadas. Estudos realizados na Região Metropolitana de São Paulo indicam máximos de concentração de ozônio predominantemente na primavera, seguidos pelo verão, evidenciando a forte dependência desse poluente das condições meteorológicas e da disponibilidade de precursores atmosféricos (Carvalho et al., 2020; CETESB, 2023).

Por fim, o SO₂ apresenta menor variabilidade sazonal nos valores extremos, embora com discreta elevação no inverno. Esse comportamento sugere a predominância de fontes pontuais e relativamente estáveis ao longo do ano, além da redução significativa das emissões associada à adoção de combustíveis com baixo teor de enxofre e à implementação de políticas de controle ambiental.

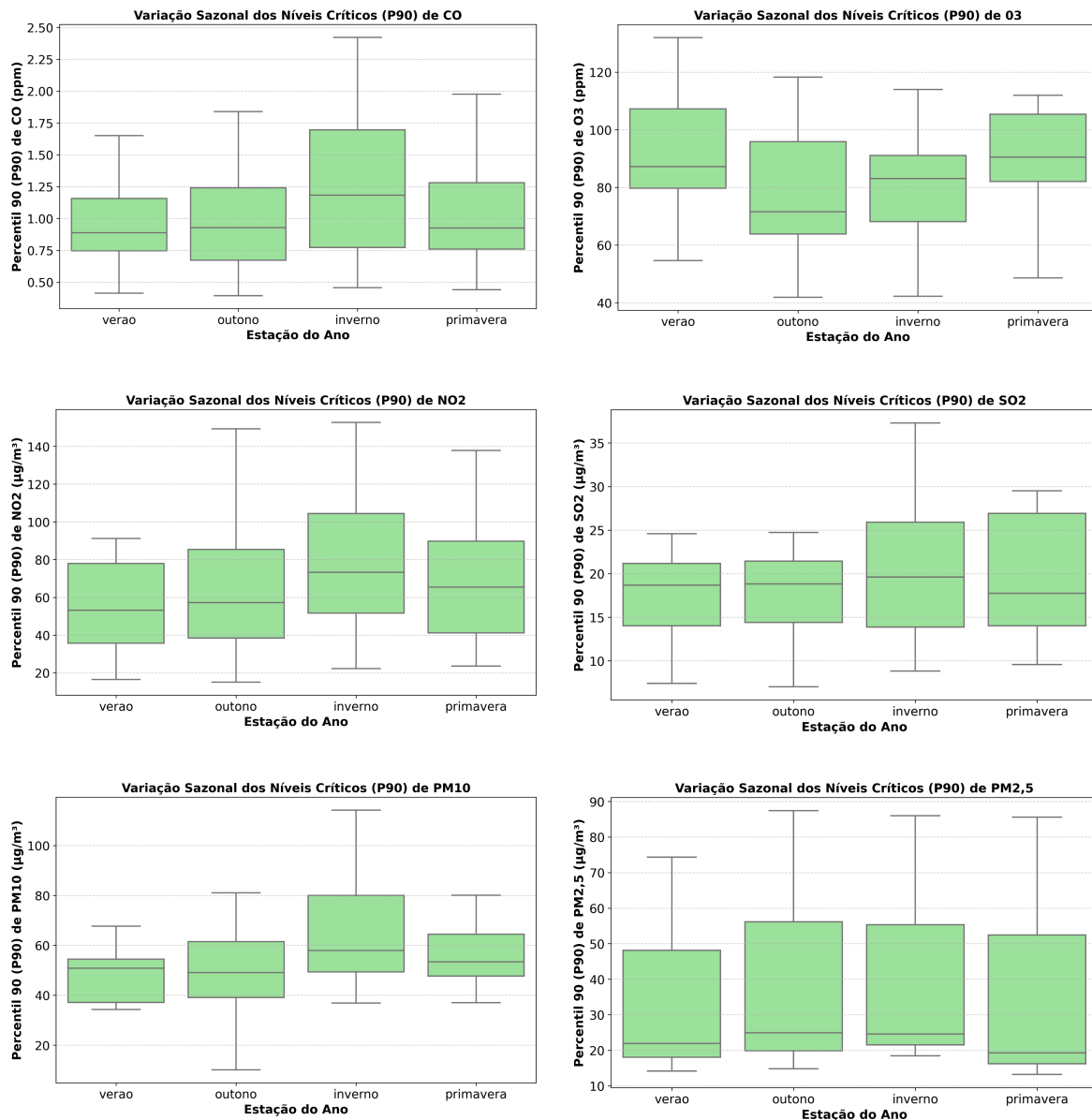


Figura 17 - Distribuição sazonal dos valores extremos (P90) dos poluentes atmosféricos na RMRJ

De forma integrada, os resultados indicam que os episódios críticos de poluição por poluentes primários (CO, NO₂, MP₁₀ e MP_{2,5}) ocorrem predominantemente no inverno, quando as condições meteorológicas limitam a dispersão, enquanto os eventos extremos de ozônio concentram-se nas estações mais quentes. Assim, a análise baseada no P90 complementa a avaliação das médias sazonais, evidenciando não apenas o comportamento típico das concentrações, mas também os períodos de maior severidade da poluição atmosférica na RMRJ.

4.4. Relação entre concentrações médias anuais e emissões veiculares estimadas (CO, NO_x e MP)

A avaliação da qualidade do ar em regiões metropolitanas requer a integração de diferentes bases de informação, uma vez que as concentrações atmosféricas observadas resultam não apenas das emissões diretas das fontes poluidoras, mas também de processos de dispersão, transporte e transformação química na atmosfera. Nesse contexto, os gráficos apresentados em painel na Figura 18 permitem analisar a relação entre as concentrações médias anuais medidas de poluentes atmosféricos e as emissões veiculares estimadas, associadas a diferentes fases do PROCONVE (L3 a L7), comparando abordagens absolutas e relativas (normalizadas pela frota). Essa abordagem dialoga com a literatura recente, que destaca que, mesmo quando políticas de controle veicular são implementadas, os efeitos sobre as concentrações ambientais podem variar entre cidades e poluentes e nem sempre se mostram estatisticamente detectáveis, devido à influência de fatores externos, como condições meteorológicas, crescimento da frota, alterações no tráfego e contribuição de outras fontes emissoras (Réquia; Melo, 2024). Contudo, deve-se destacar que esta análise possui caráter exploratório e descritivo, não configurando teste estatístico de causalidade entre emissões estimadas e concentrações observadas.

A distinção entre emissões absolutas (painéis à esquerda) e relativas (painéis à direita) é relevante para a interpretação dos resultados. Nos gráficos relativos (t/veículo·ano), observa-se de forma mais clara a redução do potencial emissor médio por veículo ao longo das fases do PROCONVE, evidenciando os ganhos tecnológicos e regulatórios. Já nos gráficos absolutos (10⁶ t/ano), essa redução tende a ser menos pronunciada, pois incorpora simultaneamente o crescimento da frota e da atividade de transporte. Assim, a leitura conjunta dos painéis sugere que, embora a emissão por veículo tenha diminuído ao longo do tempo, o aumento do número de veículos e da intensidade de uso atua no sentido de amortecer reduções na carga total emitida. Esse comportamento ajuda a explicar por que, em alguns casos, a redução das concentrações atmosféricas não ocorre na mesma magnitude observada nas emissões específicas. Nesse sentido, a inclusão da evolução da frota veicular constitui um elemento importante para aprofundar essa interpretação.

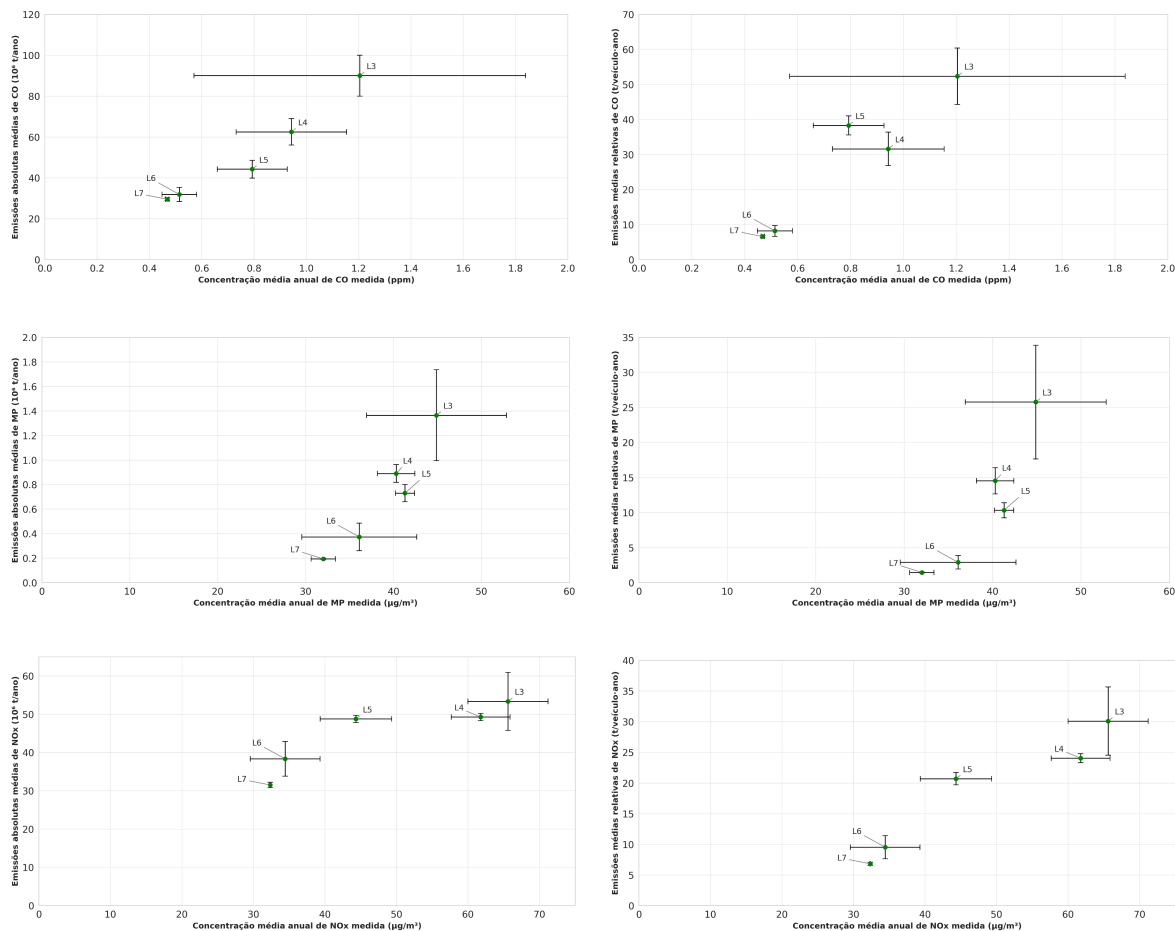


Figura 18 – Relação entre concentrações médias anuais medidas e emissões veiculares estimadas de CO, NO_x e MP, por fase do PROCONVE (L3–L7), em abordagens absoluta (10⁶ t/ano) e relativa (t/veículo·ano)

De maneira geral, os gráficos evidenciam que a relação entre emissões estimadas e concentrações atmosféricas não ocorre de forma uniforme para todos os poluentes, refletindo diferenças em suas características físico-químicas, nos mecanismos de emissão e nos processos atmosféricos envolvidos. Enquanto o CO apresenta comportamento mais diretamente associado às emissões veiculares, por se tratar de um poluente primário com baixa reatividade atmosférica e forte dependência do tráfego urbano, NO_x e MP apresentam dinâmica mais complexa, sendo influenciados por variabilidade meteorológica, processos de transformação e participação de múltiplas fontes emissoras.

Além disso, os gráficos apresentam barras de erro associadas aos desvios padrão das concentrações e das emissões, fornecendo uma dimensão relevante da variabilidade dos dados analisados. No caso das concentrações atmosféricas, os desvios padrão elevados refletem a variabilidade natural dos níveis de poluição ao longo do ano, associada a fatores

como sazonalidade, ocorrência de eventos meteorológicos e mudanças no padrão de tráfego. No caso das emissões veiculares estimadas, os desvios padrão representam a variabilidade dos valores estimados ao longo do intervalo temporal correspondente a cada fase do PROCONVE, refletindo mudanças graduais na frota circulante, no perfil de uso dos veículos e na transição tecnológica.

Sendo assim, mesmo quando há tendência de redução associada ao avanço regulatório, a elevada variabilidade observada pode reduzir a capacidade de identificar relações estatisticamente significativas entre emissões e concentrações, especialmente em análises agregadas por fases do PROCONVE. Esse comportamento é coerente com a literatura recente, que aponta que séries temporais observacionais em ambientes urbanos podem apresentar respostas não lineares e influenciadas por múltiplos fatores ambientais e estruturais (Réquia; Melo, 2024).

O gráfico de CO absoluto (veículos leves) evidencia uma tendência consistente de redução progressiva tanto das concentrações médias anuais medidas quanto das emissões absolutas estimadas à medida que o PROCONVE avança de L3 para L7. Esse comportamento sugere uma relação mais direta entre contribuição veicular total de CO e o nível médio observado na atmosfera, condizente com o caráter primário do poluente e sua forte associação com combustão incompleta. A redução mais pronunciada nas fases mais antigas é compatível com a introdução e aprimoramento de tecnologias de controle em veículos leves. Embora este painel utilize CO, vale destacar que análises observacionais no próprio município do Rio de Janeiro identificaram redução de compostos orgânicos associados ao tráfego e diminuição do potencial de formação de ozônio ao longo do tempo, apesar do aumento do volume de tráfego, apontando contribuição das exigências regulatórias do PROCONVE na redução da reatividade atmosférica ligada a emissões veiculares (Tavares et al., 2025).

Os desvios padrão das concentrações foram calculados a partir da variabilidade interanual dentro de cada fase do PROCONVE. Logo, as barras de erro horizontais associadas às concentrações em fases mais antigas indicam maior variabilidade, coerente com maior heterogeneidade tecnológica e operacional da frota, além da influência de meteorologia e padrões de tráfego. A análise do CO relativo reforça que a redução não se explica apenas por mudanças na carga total emitida, mas também por queda expressiva na emissão média por veículo. A aproximação entre fases mais recentes pode indicar ganhos marginais menores após certo patamar tecnológico, embora a tendência global (L3-L7) permaneça clara.

Para NO_x, observa-se comportamento semelhante no que se refere à redução das emissões relativas por veículo, indicando efetividade regulatória também para esse poluente. Entretanto, as concentrações atmosféricas apresentam resposta menos direta do que no caso do CO, o que pode ser explicado pela influência de processos de dispersão, transformações químicas e contribuição de múltiplas fontes emissoras. Essa dissociação parcial entre emissões estimadas e concentrações medidas é coerente com a literatura, que aponta respostas heterogêneas entre poluentes e localidades.

No caso do material particulado, a análise conjunta dos gráficos à esquerda (absoluto) e à direita (relativo) evidencia redução expressiva das emissões específicas por veículo, especialmente associada à evolução tecnológica dos motores diesel. No entanto, a redução das emissões totais é menos acentuada, indicando que o crescimento da frota e da atividade de transporte contribui para compensar parte dos ganhos tecnológicos. Esse aspecto é particularmente relevante, uma vez que o material particulado apresenta elevada importância sanitária e pode ter contribuição significativa de veículos mais antigos ou em desconformidade.

Essa evidência reforça que políticas tecnológicas (novos limites e novas fases do PROCONVE) são fundamentais, mas podem ter efeito limitado sobre emissões totais e concentrações ambientais quando não acompanhadas de estratégias complementares. Entre essas, destacam-se a renovação efetiva da frota, a fiscalização de veículos em desconformidade e, sobretudo, medidas estruturais voltadas à redução da dependência do transporte individual motorizado, como o fortalecimento do transporte público, incentivo a modos ativos de deslocamento e planejamento urbano integrado. Nessa mesma direção, avaliações de impacto à saúde associadas ao PROCONVE indicam que o programa contribui para a manutenção e redução de concentrações de poluentes (como MP₁₀ e NO₂) em séries históricas, com implicações sanitárias relevantes, reforçando a importância de políticas contínuas e integradas (Abe; Miraglia, 2018).

A análise conjunta dos gráficos absolutos e relativos evidencia que a interpretação de tendências ambientais pode ser significativamente influenciada pela forma de apresentação das emissões: gráficos relativos tornam mais visível o efeito tecnológico por veículo, enquanto gráficos absolutos incorporam crescimento de frota e intensificação do uso do transporte. Em síntese, o painel sugere que as fases mais recentes do PROCONVE estão associadas a menores emissões estimadas e, em muitos casos, menores concentrações médias anuais medidas para CO, NO_x e MP, embora com respostas diferenciadas conforme o poluente. Tais resultados são compatíveis com discussões clássicas no Brasil que associam

políticas de controle veicular a melhorias na qualidade do ar, ainda que com persistência de desafios e heterogeneidade espacial e temporal (Carvalho et al., 2015).

Por fim, os resultados reforçam que políticas baseadas exclusivamente em padrões de emissão, embora essenciais, não são suficientes para garantir reduções sustentadas da poluição atmosférica. Para poluentes como NO_x e material particulado, cuja dinâmica envolve múltiplas fontes e processos atmosféricos complexos, torna-se fundamental a adoção de estratégias integradas que incluam não apenas o controle tecnológico das emissões, mas também a gestão da demanda por transporte, a melhoria da mobilidade urbana e a redução da frota circulante, visando maximizar os benefícios ambientais e à saúde pública (Réquia; Melo, 2024; Leirião; Miraglia, 2019; Abe; Miraglia, 2018).

4.5. Relação com as Políticas Públicas

A evolução da qualidade do ar na RMRJ, ao longo do período de 1998 a 2023, reflete a interação entre mudanças estruturais urbanas, crescimento populacional, intensificação da mobilidade e implementação gradual de políticas públicas voltadas ao controle de emissões atmosféricas. Nesse contexto, os resultados obtidos neste estudo sugerem que os avanços observados na redução de concentrações e excedências de determinados poluentes podem estar associados ao fortalecimento de instrumentos regulatórios ambientais e ao desenvolvimento de tecnologias mais limpas, especialmente no setor de transportes. No caso específico da RMRJ, a tendência de redução observada para poluentes primários como CO e NO₂, contrastando com a persistência de excedências para MP e O₃, é compatível com os efeitos esperados da implementação de políticas de controle de emissões, ainda que essa relação não possa ser estabelecida de forma causal, devido à influência de fatores como condições meteorológicas, crescimento da frota veicular e contribuição de outras fontes emissoras. Dessa forma, os resultados apontam que os instrumentos regulatórios produziram ganhos relevantes, porém não uniformes entre os diferentes contaminantes atmosféricos.

Entre as políticas públicas mais relevantes destaca-se o PROCONVE, instituído pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e executado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Desde sua criação, o programa passou por diferentes fases sucessivas, promovendo a redução progressiva dos limites máximos de emissão para veículos novos e estimulando a modernização tecnológica da frota nacional. Essas fases impulsionaram a adoção de sistemas mais eficientes de controle de emissões, como catalisadores, melhorias nos sistemas de combustão e, especialmente para

veículos pesados, avanços associados a motores mais eficientes e a mecanismos de redução de material particulado. Estudos técnicos e relatórios consolidados apontam que o PROCONVE representa uma das políticas ambientais mais relevantes do país, sendo fundamental para a mitigação da poluição urbana e para a redução gradual de emissões veiculares ao longo das últimas décadas (CETESB, 2017; CETESB, 2023).

Além do controle tecnológico aplicado aos veículos, as melhorias na qualidade dos combustíveis constituem outro eixo relevante no processo de mitigação da poluição atmosférica urbana. No presente estudo, a redução observada nas concentrações médias anuais de poluentes primários, como CO, NO₂ e SO₂, especialmente a partir dos anos 2000, é compatível com a implementação de medidas regulatórias voltadas à melhoria dos combustíveis e ao controle de emissões veiculares. A redução progressiva do teor de enxofre no diesel, impulsionada por exigências regulatórias e alinhada a padrões internacionais, teve papel importante no controle de poluentes associados à combustão, particularmente no caso do SO₂, que apresentou tendência de queda ao longo da série histórica analisada. Relatórios técnicos indicam que a melhoria dos combustíveis representa uma estratégia essencial para a redução de emissões, pois permite maior eficiência dos sistemas de controle veicular e reduz diretamente a carga poluente emitida na atmosfera (CETESB, 2017; CETESB, 2023).

Apesar desses avanços, os resultados obtidos neste estudo indicam que a melhoria da qualidade do ar não ocorre de maneira uniforme e contínua, sendo influenciada por fatores adicionais como variabilidade meteorológica, expansão urbana, crescimento da frota, mudanças no perfil do transporte e intensificação do uso do modal rodoviário. Essa complexidade é reforçada por análises recentes que destacam que políticas públicas ambientais podem produzir efeitos positivos mensuráveis, mas frequentemente apresentam respostas heterogêneas entre poluentes e regiões, especialmente quando o sistema urbano passa por crescimento acelerado e mudanças estruturais no padrão de emissões (Réquia; Melo, 2024). Dessa forma, embora políticas como o PROCONVE sejam fundamentais, sua efetividade pode ser parcialmente limitada por fatores externos ao controle tecnológico, exigindo interpretação cautelosa e integrada dos resultados.

Outro aspecto relevante observado ao longo do período analisado refere-se à persistência de desafios associados a poluentes que não dependem exclusivamente de emissões diretas, como o O₃ e, em parte, o MP_{2,5}. No presente estudo, o O₃ não apresentou uma tendência de redução clara ao longo da série histórica, além de registrar frequentes excedências aos padrões de qualidade do ar, evidenciando sua dependência de processos fotoquímicos e de condições meteorológicas. De forma semelhante, o MP_{2,5} manteve

concentrações elevadas e episódios críticos, mesmo nos anos mais recentes, indicando a influência combinada de múltiplas fontes emissoras e processos atmosféricos. Nesse contexto, estratégias voltadas exclusivamente ao controle veicular podem ser insuficientes para garantir melhorias abrangentes e sustentadas, reforçando a necessidade de políticas integradas que considerem diferentes fontes emissoras, características locais de uso e ocupação do solo e a dinâmica climática regional. Ressalta-se também que, além das políticas federais, a efetividade do controle da poluição atmosférica depende de ações em escala estadual e municipal, incluindo fiscalização ambiental, planejamento da mobilidade urbana, gestão do transporte público e ordenamento territorial. A articulação entre diferentes níveis de governança é fundamental para potencializar os efeitos das políticas tecnológicas e ampliar seus impactos ambientais.

Cabe destacar ainda que os impactos da poluição atmosférica não se distribuem de forma homogênea no território da RMRJ, afetando de maneira mais intensa populações residentes em áreas com maior densidade viária, atividade industrial ou menor infraestrutura urbana. Evidências internacionais reforçam esse padrão de desigualdade: revisão sistemática conduzida por Frazenburg, Sepadi e Chitakira (2025) demonstrou que mulheres, crianças e comunidades de baixa renda tendem a sofrer impactos desproporcionais da má qualidade do ar, com predominância de efeitos respiratórios e repercussões gerais sobre a saúde, além de lacunas específicas no estudo da vulnerabilidade feminina. Estudos baseados em mapeamento de alta resolução também indicam exposição persistentemente maior de comunidades socioeconomicamente desfavorecidas a poluentes como NO_2 e $\text{MP}_{2,5}$, ainda que com dinâmicas distintas entre contaminantes e ao longo do tempo (Su et al., 2024). Em escala global, análises integradas de poluição e pobreza mostram que populações de menor renda concentram maior exposição a níveis inseguros de material particulado fino, evidenciando a forte inter-relação entre desigualdade econômica e risco ambiental (Rentschler; Leonova, 2023). Assim, políticas públicas voltadas à qualidade do ar também possuem dimensão socioambiental, devendo considerar critérios de equidade territorial e justiça ambiental. Dessa forma, análises futuras na RMRJ deveriam incorporar abordagens espaciais integradas entre qualidade do ar e indicadores socioeconômicos, ampliando a compreensão dos impactos distributivos das políticas ambientais.

Adicionalmente, os resultados evidenciam a importância da ampliação e continuidade do monitoramento atmosférico como instrumento estratégico de gestão ambiental. A presença de lacunas temporais em determinadas séries históricas e a irregularidade do monitoramento em alguns períodos dificultam análises contínuas e reduzem a capacidade de diagnóstico

preciso sobre a evolução da qualidade do ar. A literatura aponta que a limitação de dados atmosféricos é um dos principais entraves para a compreensão dos processos de poluição urbana no Brasil, restringindo tanto a avaliação da efetividade de políticas públicas quanto o direcionamento de ações de controle baseadas em evidências (Boari; Pedruzzi; Vieira-Filho, 2023). Assim, o fortalecimento da rede de monitoramento e a consolidação de séries históricas mais completas são fundamentais para subsidiar o planejamento ambiental e o aprimoramento das políticas públicas voltadas à qualidade do ar.

A melhoria contínua da qualidade do ar está diretamente relacionada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o ODS13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), reforçando que políticas atmosféricas constituem instrumento estratégico para o desenvolvimento urbano sustentável.

Portanto, os resultados obtidos neste estudo reforçam que políticas públicas ambientais, especialmente aquelas voltadas ao controle de emissões veiculares e à melhoria dos combustíveis, contribuíram de forma significativa para avanços nos indicadores de qualidade do ar na RMRJ. Contudo, os desafios ainda persistem, evidenciando que a dinâmica da poluição atmosférica em regiões metropolitanas é influenciada por múltiplos fatores, o que exige abordagens integradas de gestão ambiental, capazes de considerar simultaneamente o controle tecnológico, a estrutura urbana e a variabilidade climática regional. Nesse sentido, estratégias complementares, como programas mais rigorosos de inspeção e manutenção veicular, renovação acelerada da frota pesada, incentivo à mobilidade ativa e eletrificação do transporte público, podem potencializar os ganhos observados ao longo do período analisado.

Em síntese, a consolidação de políticas públicas baseadas em evidências, aliada ao monitoramento contínuo e à integração entre controle tecnológico, planejamento urbano e gestão climática regional, constitui condição essencial para a promoção de melhorias ambientais sustentadas e para a proteção da saúde da população.

5. CONCLUSÕES

Este estudo analisou a evolução temporal e espacial da qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) no período de 1998 a 2023, integrando dados observacionais, estimativas de emissões veiculares e evolução da frota, com o objetivo de compreender a dinâmica da poluição atmosférica e sua relação com políticas públicas de controle de emissões.

Os resultados evidenciam avanços substanciais no controle de poluentes primários, especialmente aqueles diretamente associados ao setor de transportes. As concentrações de monóxido de carbono (CO) apresentaram redução expressiva de aproximadamente 57,9% entre 2002 e 2023, passando de cerca de 1,9 ppm para valores inferiores a 0,8 ppm. O dióxido de nitrogênio (NO₂) também apresentou tendência de redução, especialmente após a implementação da fase P7 do PROCONVE, embora com variabilidade espacial e episódios pontuais de aumento em algumas estações. Para o dióxido de enxofre (SO₂), observou-se redução superior a 70%, associada principalmente à diminuição do teor de enxofre nos combustíveis, que passou de aproximadamente 2.000 ppm na década de 1990 para 10 ppm na década de 2010.

Apesar desses avanços, os resultados revelam limitações importantes no alcance das políticas públicas, sobretudo quando analisados à luz de padrões internacionais mais restritivos. O material particulado (MP₁₀) apresentou reduções mais modestas, com concentrações ainda variando entre 30 e 50 µg/m³, frequentemente acima do valor guia anual da Organização Mundial da Saúde (15 µg/m³). O MP_{2,5} apresentou cenário ainda mais crítico, com concentrações médias entre 10 e 20 µg/m³ e registros superiores a 300 dias por ano acima dos valores de referência em algumas estações, evidenciando exposição crônica da população.

O ozônio troposférico (O₃), por sua vez, não apresentou tendência clara de redução, mantendo concentrações típicas entre 0,03 e 0,05 ppm, com episódios recorrentes de ultrapassagem dos padrões. Esse comportamento evidencia a complexidade associada à formação de poluentes secundários e a limitação de estratégias baseadas exclusivamente na redução de emissões diretas.

A análise espacial identificou zonas críticas de degradação da qualidade do ar, com destaque para a Baixada Fluminense, especialmente o município de Duque de Caxias, onde se observou elevada frequência de excedências associadas à combinação de fontes veiculares, industriais e características socioambientais desfavoráveis.

A integração entre concentrações medidas e emissões veiculares estimadas indicou que, embora tenha ocorrido redução superior a 80% nas emissões unitárias de veículos novos ao longo das fases do PROCONVE, a redução nas concentrações atmosféricas foi menos pronunciada. Esse descompasso está associado ao crescimento da frota e da mobilidade urbana, que tende a compensar parcialmente os ganhos tecnológicos, evidenciando que a redução da emissão por veículo não se traduz automaticamente em redução proporcional da carga total emitida.

Do ponto de vista temporal, os resultados evidenciaram padrões consistentes: poluentes primários apresentaram maiores concentrações no inverno, com incrementos de até 20% a 50%, associados à menor dispersão atmosférica, enquanto o ozônio apresentou máximos na primavera e no verão, em função da maior radiação solar. A análise horária e semanal reforçou a influência do tráfego veicular, com reduções de aproximadamente 14% para CO e 30% para NO₂ aos domingos, em comparação aos dias úteis.

De forma geral, os resultados sugerem que o PROCONVE foi altamente eficaz na redução das emissões veiculares específicas e contribuiu para melhorias relevantes na qualidade do ar na RMRJ. No entanto, a persistência de concentrações elevadas de material particulado e ozônio, frequentemente acima das diretrizes da Organização Mundial da Saúde, indica que os padrões nacionais ainda são menos restritivos e que as políticas atuais não são suficientes para garantir níveis plenamente seguros à saúde.

Nesse contexto, a melhoria sustentada da qualidade do ar na RMRJ depende da adoção de estratégias integradas que vão além do controle tecnológico, incluindo a renovação acelerada da frota, a eletrificação do transporte, o fortalecimento do transporte público, o incentivo a modos ativos de deslocamento e o controle de fontes não veiculares. Adicionalmente, destaca-se a importância da ampliação e modernização da rede de monitoramento atmosférico, de modo a reduzir lacunas de dados e aprimorar o diagnóstico ambiental.

Por fim, conclui-se que a evolução da qualidade do ar na RMRJ reflete a interação entre avanços tecnológicos, crescimento da mobilidade urbana e processos atmosféricos complexos. Embora melhorias significativas tenham sido observadas, a convergência aos padrões internacionais mais protetivos exige políticas públicas mais abrangentes, integradas e alinhadas ao planejamento urbano sustentável, de forma a promover benefícios efetivos à saúde da população e à qualidade ambiental nas próximas décadas.

6. REFERÊNCIAS

ABE, K. C.; MIRAGLIA, S. G. E. K. Avaliação de impacto à saúde do programa de controle de poluição do ar por veículos automotores no município de São Paulo, Brasil. **RBCIAMB**, v.1, n.47, p. 61-73, 2018.

ALONSO, M. F.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R., FONSECA, R. M.; MARÉCAL, V. PIRRE, M.; KLENNER, L. G. An urban emissions inventory for South America and its application in numerical modeling of atmospheric chemical composition at local and regional scales. **Atmospheric Environment**, v.44, n.01, p. 5072-5083, 2010.

ANDRADE, M. F.; KUMAR, P.; FREITAS, E. D.; YONUE, R. Y.; MARTINS, J.; MARTINS, L. D.; NOGUEIRA, T. PEREZ–MARTINEZ, P.; MIRANDA, R. M.; ALBUQUERQUE, T.; GONÇALVES, F. L. T.; OYAMA, B.; ZHANG, Y. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, v. 159, n. 01, p. 66-82, 2017.

ARBILLA, G.; DANTAS, G.; DA SILVA, C. M. Tijuca forest contribution to the improvement of air quality and wellbeing of citizens in the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Chemosphere**, v. 334, 139017, 2023.

ARBILLA, G.; RODRIGUES, J. R. B. A.; DA SILVA, C. M.; Fine Particulate Matter: Brazilian Legislation in the Light of the World Health Organization Guidelines. **Revista Virtual de Química**, v. 14, p. 359-371, 2022.

ABVE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. **Eletrificados crescem 145% no trimestre**. São Paulo, 2024. Disponível em: <<https://abve.org.br/eletrificados-crescem-145-no-trimestre-e-tem-segundo-melhor-mes-da-historia/>>. Acesso em: 06 jun. 2024.

BOARI, A.; PEDRUZZI, R.; VIEIRA-FILHO, M. Air pollution trends and exceedances: ozone and particulate matter outlook in Brazilian highly urbanized zones. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, p. 1058, 2023.

BORKHADE, R.; BHAT, K. S.; MAHESHA, G. T. Implementation of Sustainable Reforms in the Indian Automotive Industry: From Vehicle Emissions Perspective. **Civil & Environmental Engineering - Cogent Engineering**, v. 9, n. 01, 2022.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 968**, de 30 de abril de 2024. Dispõe sobre a especificação dos combustíveis comercializados no Brasil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2 maio 2024.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Programa Rota 2030: Mobilidade e Logística**. 2023 Disponível em: <<https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>>. Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 224, p. 155-156.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Veículos emitem menos poluentes**. Brasília, 2014. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/veiculos-emitem-menos-poluentes>>. Acesso em: 1 mar. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Poluição atmosférica na ótica do sistema único de saúde: Vigilância em Saúde ambiental e Qualidade do ar**. Brasília: Ministério da Saúde, 2021.

CARVALHO, V. S. B.; FREITAS, E. D.; MARTINS, L. D.; MARTINS, J. A.; MAZZOLI, C. R.; ANDRADE, M. F. Air quality status and trends over the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil as a result of emission control policies. **Environmental Science & Policy**, v. 47, n. 01, p. 68-79, 2015.

CARVALHO, V. S. B.; BOLZAN, F. M. ; SILVEIRA, W. W. ; CAMPOS, B. ; SIMÕES, J. B. Variance analysis applied to ground-level ozone concentrations in the state of São Paulo, Brazil. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 37, n. 01, p. 505–513, 2020.

CARVALHO, V. S. B.; SILVA, P. N.; FREITAS, A. A.; TENÓRIO, V. L. S. R.; REBOITA, M. S.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; MARTINS, L. D. Occurrence and Atmospheric Patterns Associated with Individual and Compound Heatwave–Ozone Events in São Paulo Megacity. **Atmosphere**, v. 16, n. 07, p. 822, 2025.

CEPERJ – Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro. **Aspectos naturais do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: CEPERJ, 2010. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/brasil/aspectos-naturais-estado-rio-janeiro.htm>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Evolução e futuro do PROCONVE**. História e resultados dos 30 anos de política de controle das emissões dos veículos do Brasil. São Paulo: CETESB, 2017.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2023.

COPPE/UFRJ. **Estudo aponta redução de 80% no índice de emissão de poluentes até 2010**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/estudo-aponta-reducao-de-80-no-indice-de-emissao-de-poluente>>. Acesso em: 1 mar. 2025.

COPPETEC. **Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2020/05/relatorio_inventario_2011.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2025.

DANTAS, G.; SICILIANO, B.; FRANÇA, B. B.; SILVA, C. M.; ARBILLA, G. The impact of COVID-19 partial lockdown on the air quality of the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 729, n. 01, 2020.

DUARTE, E. S. F.; FRANKE, P.; LANGE, A. C.; FRIESE, E.; LOPES, F. J. S.; SILVA, J. J.; REIS, J. S.; LANDULFO, E. SILVA, C. M. S.; ELBERN, H.; HOELZEMANN, J. J. Evaluation of atmospheric aerosols in the metropolitan area of São Paulo simulated by the regional EURAD-IM model on high-resolution. **Atmospheric Pollution Research**, v.12, n.01, p.451-469, 2021.

El País. **Sensação térmica de mais de 60 graus:** por que faz mais calor nas favelas do Rio. El País Brasil, 8 abr. 2025. Disponível em: <https://elpais.com/america-futura/2025-04-08/sensacao-termica-de-mais-de-60-graus-por-que-faz-mais-calor-nas-favelas-do-rio.html>. Acesso em: 14 abr. 2025.

EXAME. **Caminhoneiros na pandemia: volume de carga transportada por rodovias aumentou 62% em 2020.** São Paulo, 2021. Disponível em: <https://exame.com/negocios/caminhoneiros-na-pandemia-volume-de-carga-transportada-por-rodovias-aumentou-62-em-2020/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

FILHO, W. L. F. C.; COSTA, R. R.; TAVELLA, R. A.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; SANTIAGO, D. B.; JUNIOR, C. A. S.; JÚNIOR, F. M. R. S.; NICOLETTE, R. F. Evaluation of the PM2.5 concentrations in South America: Climatological patterns and trend analysis. *Atmospheric Environment*, v.338, 120800, 2024.

FIORIO, J. F. O.; OLIVEIRA, B. S.; CANDIDO, K. N.; SANTOS, R. G. Panorama da eletrificação veicular no estado de São Paulo. *Journal of Urban Technology and Sustainability*, v. 6, n. 1, p. 54, 2023.

FREITAS, E. D.; IBARRA-ESPINOSA, S.; GAVIDIA-CALDERON, M.; REHBEIN, A.; RAFEE, S. A. A.; MARTINS, J.; MARTINS, L. D.; SANTOS, U. P.; NING, M. F.; ANDRADE, M. F.; TRINDADE, R. I. F. Mobility restrictions and air quality under covid-19 Pandemic in São Paulo, Brazil. *Preprints*, v.1, 2020.

FRAZENBURG, C.; SEPADI, M. M.; CHITAKIRA, M. Investigating the disproportionate impacts of air pollution on vulnerable populations in South Africa: a systematic review. *Atmosphere*, v. 16, n. 1, p. 49, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos16010049>

GOIS, G.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; SILVA, E. B.; MAIA, J. L. M.; ALELUIA, I. S. S.; TEODORO, P. E. Carbon monoxide trend in the city of rio de janeiro via Mann-Kendall and Cusum Tests. *Biosci. J.*, v. 33, n. 5, p. 1332-1339, 2017.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Avaliação dos impactos econômicos e dos benefícios socioambientais do Proconve/João Batista Drummond Câmara.** Brasília: Edições Ibama, 2016.106 p.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).** Brasília, 2023.

IBGE. **Censo Demográfico 2022:** Panorama. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>. Acesso em: 18 agosto 2024.

IEMA - Instituto De Energia E Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 Ano-base 2012.** São Paulo: IEMA, 2013. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/produto/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-por-veiculos-automotores-rodoviarios-2013-ano-base-2012>. Acesso em: 10 jun. 2025.

INEA. **Inventário de Emissões Veiculares do Estado do Rio de Janeiro.** 2016. Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente, 2016. Disponível em: <<https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/Invent%C3%A1rio-de-Emiss%C3%B5es-de-Fontes-Veiculares.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2025.

INEA. **Inventário de Emissões Veiculares do Estado do Rio de Janeiro**. 2022. Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente, 2022. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2024/06/Invent%C3%A1rio-de-Emiss%C3%B5es-Veiculares-Ano-Base-2022-final_ok.pdf>. Acesso em: 16 jun 2025.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil: 1991–2020**. Brasília: INMET, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: 14 abr. 2025.

IPCC – PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Acesso em: 3 jan. 2025.

JUNIOR, J. A. C.; SANTOS, L. B. Estado e Indústria automobilística no Brasil: Análise das políticas InovAs-Auto e Rota 2030. **Revista Entre-Lugar**, v.11, n.21, p.101-127, 2020.

JUSTO, E. P.; QUIJANO, M. F. C.; BERINGUI, K.; VENTURA, L. B.; PEREIRA, G. M.; VASCONCELLOS, P. D. C.; GIODA, A. Assessment of the impact of the bus fleet and transportation infrastructure works on the air quality in Rio de Janeiro (Olympic Games 2016). **Air Quality, Atmosphere & Health**, v.16, n.02, p.289–309, 2023.

KRECL, P.; CASTRO, L. B.; TARGINO, A. C.; OUKAWA, G. Y. Spatio-temporal variability and trends of air pollutants in the Metropolitan Area of Curitiba. **Heliyon**, v. 10, n. 01, 2024.

LEIRIÃO, L. F. L.; MIRAGLIA, S. G. E. K. Environmental and health impacts due to the violation of Brazilian emissions control program standards in Sao Paulo Metropolitan Area. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 70, p. 70–76, 2019.

LELIEVELD, J.; EVANS, J. S.; FNAIS, M.; GIANNADAKI, D.; POZZER, U. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. **Nature**, v. 525, n. 01, p. 367–371, 2015.

LIMA, S. S.; ARMOND, N. B. Chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: caracterização, eventos extremos e tendências. **Sociedade & Natureza**, v.34, n. 01, 2022.

MENDES, L. M. M. C.; CARVALHO, V. S. B.; MARTINS, F. B.; ALBUQUERQUE, T. T. A. Patterns related to pollutant concentrations in the Metropolitan Area of Belo Horizonte. **Atmosfera**, v.36, n.02, p.329-341, 2023.

MIYAJAN, J. S.; DESAI, H. H. Diurnal Concentration of Carbon Monoxide (CO) as an Indicator of Vehicular Pollution in Urban Area of Surat City, Gujarat, India. **Journal of Energy Research and Environmental Technology**, v. 2, n. 01, p. 278-280, 2015.

MOLINA, L. T. Introductory Lecture: Air Quality in Megacities. **Faraday Discussions**, v. 226, n. 19, 2020.

MONKS, P. S.; GRANIER, C.; FUZZI, S.; STOHL, A.; WILLIAMS, M. L.; AKMOTO, H.; AMANN, M.; BAKLANOV, A.; BALTENSPERGER, U.; BEY, I.; BLAKE, N.; BLAKE, R. S.; CARSLAW, K.; COOPER, O. R.; DENTENER, F.; FOWLER, D.; FRAGKOU, E.; FROST, G. J.; GENEROSO, S.; GINOUX, P.; VON GLASOW, R. Atmospheric composition change – global and regional air quality. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 33, p. 5268–5350, 2009.

MONKS, P. S.; ARCHIBALD, A. T.; COLETTE, A.; COOPER, O.; COYLE, M.; DERWENT, R.; FOWLER, D.; GRANIER, C.; LAW, K. S.; MILLS, G. E.; STEVENSON, D. S.; TARASOVA, O.; THOURET, V.; VON SCHNEIDEMESSER, E.; SOMMARIVA, R.; WILD, O.; WILLIAMS, M. L. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, 8889-8973

PERALTA, A. H. D.; CALDERÓN, M. G.; ANDRADE, M. F. Future Ozone Levels Responses to Changes in Meteorological Conditions under RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios over São Paulo, Brazil. **Atmosphere**, v. 14, n.04, p. 626, 2023.

PEREIRA, R. H. M.; PARGA, J. P.; SARAIVA, M.; BAZZO, J. P.; TOMASIELLO, D.; SILVA, L. P.; NADALIN, V. G.; BARBOSA, R. J. et al. **Forma urbana e mobilidade sustentável: evidências de cidades brasileiras**. Rio de Janeiro: Ipea, out. 2022.

PNME – PLANO NACIONAL DE MOBILIDADE ELÉTRICA. **Adoção de carros elétricos pode reduzir em 67% as emissões de gases de efeito estufa**. 2024. Disponível em: <https://pnme.org.br/adocao-de-carros-eletricos-reduz-67-das-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

RENTSCHLER, J.; LEONOVA, N. Global air pollution exposure and poverty. *Nature Communications*, v. 14, art. 4432, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39797-4>

RÉQUIA, W. J.; MELO, H. F. A. Effectiveness of public policies related to traffic emissions in improving air quality in Brazil: A causal inference study using Bayesian structural time-series models. **Atmospheric Environment**, v. 319, 2024.

SANTOS, F. S. **Diagnóstico das emissões atmosféricas em Minas Gerais: um estudo para as fontes fixas e veiculares**. 2018. 147 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

SANTOS, G. R.; ARAUJO, K. K. M.; SANTOS, P. A.; SILVA, G. R. P. O impacto da eletromobilidade: veículos elétricos, meio ambiente e a infraestrutura energética no Brasil. **South American Development Society Journal**, v.07, n.21, p.238-253, 2021.

SANTOS, T. C.; CARVALHO, V. S. B.; REBOITA, M. S. 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. 02, p. 307-313, 2016.

SALDIVA, P. H. N.; SANTÉE, K.; LAISERSTZJAN, L.; VERAS, M. M. Poluição do ar e DOHaD: A saúde da próxima geração com ênfase na população brasileira. **Science Direct**, v.35, n.01, p. 100416, 2023.

SCHNELL, J. L.; PETERS, D. R.; WONG, D. C.; LU, X.; GUO, H.; ZHANG, H.; KINNEY, P. L.; HORTON, D. E. Potential for electric vehicle adoption to mitigate extreme air quality events in China. **Earth's future**, v. 9, n. 2, 2020.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

SHINDELL, D.; RU, M.; ZHANG, Y.; SELTZER, K.; FALUVEGI, G.; NAZARENKO, L.; SCHMIDT, G. A.; PARSONS, L.; CHALLAPALLI, A.; YANG, L.; GLICK, A. Temporal

and spatial distribution of health, labor, and crop benefits of climate change mitigation in the United States. **Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences**, v. 118, n. 46, 2021.

SILVA, M. O.; SILVA JÚNIOR, R. S. Avaliação da qualidade do ar (NO₂, CO, O₃) na cidade de Maceió/AL utilizando o modelo atmosférico WRF/CHEM. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.03, p.801-836, 2019.

SILVEIRA, W. W. D.; CARVALHO, V. S. B. Avaliação das Condições Meteorológicas Simuladas pelo Modelo WRF na Região Metropolitana do Rio de Janeiro em Dias Com Altas Concentrações de Poluentes. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 36, 317-325.

SKIPPER, T. N.; LAWAL, A. S.; HU, Y.; RUSSELL, A. G. Air quality impacts of electric vehicle adoption in California. **Atmospheric Environment**, v. 294, 2023.

SOARES, L. M.; VENTURA, L. M. B.; MARTINS, E. M.; PINTO, F. O. Avaliação do impacto na qualidade do ar após implantação do BRS no Rio de Janeiro. **Revista Internacional de Ciências**, v. 08, n. 02, p. 203 - 220, 2018.

SOBRINHO, O. M.; MARTINS, L. D.; PEDRUZZI, R.; VIZUETE, W.; ALBUQUERQUE T. T. A. From mining to fire outbreaks: The relative impact of pollutants sources on air quality in the metropolitan area of Belo Horizonte. **Atmospheric Pollution Research**, v.15, n.01, p.102118, 2024.

SU, J. G. et al. Examining air pollution exposure dynamics in disadvantaged communities through high-resolution mapping. *Science Advances*, v. 10, eadm9986, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adm9986>

TAVARES, M. M. S.; CARNEIRO, R. G.; ARBILLA, G.; SILVA, C. M.; CORRÊA, S. M. The Effects of Reducing Vehicular Emissions in Atmospheric Hydrocarbon Concentrations in Rio de Janeiro, Brazil. **ACS Omega**, v. 10, 2025.

TERRA. **Estudo aponta que Brasil terá ar mais limpo até 2027 com crescimento da frota de veículos elétricos**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.terra.com.br/mobilidade/carros/estudo-garante-com-evs-brasil-tera-ar-mais-limp-o-ate-2027/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

VENTURA, L. M. B.; ALMEIDA, I. R. P. L.; RAMOS, M. B.; D'AGOSTO, M. A.; GIODA, A. Impacto do sistema de transporte na qualidade do ar: o caso do Rio de Janeiro, Brasil. **Sustainability in Debate**, v. 13, n.3, p. 121-137, 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Ambient (outdoor) air pollution**. Geneva: WHO, 2023

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide**. Geneva: WHO, 2021

XIE, D.; GOU, Z.; GUI, X. How electric vehicles benefit urban air quality improvement: A study in Wuhan. **Science of the Total Environment**, v. 906, 2024.

ZHU, L.; RANASINGHE, D.; CHAMECKI, M.; BROWN, M. J.; PAULSON, S. E. Clean air in cities: Impact of the layout of buildings in urban areas on pedestrian exposure to ultrafine particles from traffic. **Atmospheric Environment**, v.252, n.01, p.118267, 2021.