



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL E TENDÊNCIAS DA
QUALIDADE DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA
DE SÃO PAULO, BRASIL**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Aline Aquino de Araujo

**Itajubá, MG, Brasil
2023**

VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL E TENDÊNCIAS DA QUALIDADE DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, BRASIL

por

Aline Aquino de Araujo

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

**Orientador: Orientador: Prof. Dra. Vanessa Silveira
Barreto Carvalho**

**Itajubá, MG, Brasil
2023**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

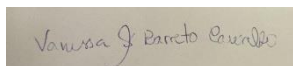
**VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL E TENDÊNCIAS DA QUALIDADE
DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, BRASIL**

elaborada por

Aline Aquino de Araujo

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dr^a. (UNIFEI)
(Orientadora)



Rafael Silva Capaz, Dr. (UNIFEI)



Débora Martins de Oliveira, MSc. (UNIFEI)

Itajubá, 10 de julho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por me permitir ter a sabedoria necessária para alcançar todos os meus objetivos e determinação para superar todos os obstáculos encontrados ao longo de todo tempo dedicado aos estudos.

Aos meus pais Aldrin e Zuleima e minha irmã Ariane, a quem devo gratidão e respeito eterno, por me incentivarem durante toda a minha vida, apoiarem em momentos difíceis e principalmente, por estarem ao meu lado comemorando todas as vitórias, por menores que fossem.

A todos os professores, por todos as horas de dedicação, ensinamentos passados, aprendizados e empenho em todo meu processo de formação profissional ao longo do curso. Em especial, a professora Vanessa pelas inúmeras reuniões, puxões de orelhas e fundamental apoio para que este estudo fosse realizado.

Aos meus amigos de curso, foram anos intensos de muito companheirismo e muita troca de experiências, obrigada por tantos momentos de descobertas e aprendizados.

Meu namorado e amigos de anos, por terem sido minha rede de apoio, estarem sempre ao meu lado, independente da situação.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, por nunca terem medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade e sempre estarem presentes me apoiando em todos os momentos da minha vida.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL E TENDÊNCIAS DA QUALIDADE DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, BRASIL

AUTOR(A): ALINE AQUINO DE ARAUJO
ORIENTADOR: VANESSA SILVEIRA BARRETO CARVALHO
Itajubá, 10 de julho de 2023.

Devido ao grande aumento da frota veicular e da população presente na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), um aumento nas emissões de poluentes foi registrado, tornando-se necessário a criação de políticas públicas que diminuíssem os danos causados por esses excessos. Desta forma, em 1986, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) instituiu a partir da Resolução nº 18/1986, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que impôs limites máximos de emissão de alguns poluentes, sendo tratados neste trabalho o monóxido de carbono (CO), material particulado com diâmetro inferior a 10 µm (MP₁₀) e dióxido de enxofre (SO₂). Como objetivo principal propôs-se avaliar as concentrações dos poluentes registradas no período de 1987 a 2021 em estações de monitoramento localizadas na RMSP, indicando as tendências verificadas através da aplicação do teste de Mann-Kendall, e sua relação com a implantação de políticas públicas para o controle da poluição do ar. Assim, foi possível comprovar a eficácia nas fases em que decorrem o PROCONVE, resultando não só na tendência de diminuição nas emissões e concentrações dos poluentes, mas também em melhorias nas tecnologias empregadas em veículos automotores.

Palavras-chave: Região Metropolitana de São Paulo. PROCONVE. Mann-Kendall. CO. MP₁₀. SO₂.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da RMSP e seus municípios dentro do estado.....	7
Figura 2: Médias climatológicas registrados em estações de monitoramento da CETESB na RMSP no período de 2007 a 2021: (a) Temperatura média (°C); (b) Umidade relativa (mm/mês); (c) Pressão atmosférica (hPa); (d) Precipitação acumulada (mm/mês).....	9
Figura 3: Estações da rede de monitoramento da qualidade do ar da CETESB na RMSP.....	11
Figura 4: Estimativa da (a) população e (b) frota veicular na RMSP segundo dados da CETESB (1987 a 2021).....	14
Figura 5: Evolução da mancha urbana na RMSP para os anos de 1990, 2000, 2010 e 2021, respectivamente.....	15
Figura 6: Estimativa de evolução das emissões de (a) CO, (b) MP10 e (c) SO ₂ respectivamente.....	18
Figura 7: Limites de concentração e resultado do teste de Mann-Kendall.....	21
Figura 8: Distribuição espacial da tendência em diferentes estações para os poluentes (a) CO, (b) MP10 e (c) SO ₂ , respectivamente, entre os anos de 1998 e 2021.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fases do PROCONVE para os poluentes CO e MP de veículos leves e pesados.....	2
Tabela 2: Estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB, localização e parâmetros analisados.....	10
Tabela 3: Comparativo das médias de CO, MP10 e SO ₂ durante as fases do PROCONVE para veículos leves na <i>RMS</i> P.....	23
Tabela 4: Comparativo das médias de CO e MP10 durante as fases do PROCONVE para veículos leves na estação de Cerqueira César.....	24
Tabela 5: Comparativo das médias de SO ₂ durante as fases do PROCONVE para veículos leves na estação de Pinheiros.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

OMS – Organização Mundial da Saúde

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

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

Proálcool – Programa Nacional do Álcool

Gasool – Mistura de gasolina e etanol

PROMOT – Programa de controle da poluição do ar por motocicletas, ciclomoteres e similares

PRONAR – Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar

CO – Monóxido de carbono

MP₁₀ – Material particulado de diâmetro inferior a 10 µm

MP – Material particulado

SO₂ – Dióxido de enxofre

NO_x – Número de oxidação

O₃ – Ozônio

PNQA – Padrões de qualidade do ar

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais

ANP – Agência Nacional do Petróleo

QGis – Quantum GIS

PI – Padrão intermediário

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO	6
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
2.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	7
2.2. CLIMATOLOGIA	8
2.3. DADOS UTILIZADOS.....	9
2.4. ANÁLISES REALIZADAS	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
3.1. O IMPACTO DO CRESCIMENTO POPULACIONAL E URBANO NAS TAXAS DE EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	14
3.2. EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DO AR	19
3.3. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS TENDÊNCIAS DA QUALIDADE DO AR	25
4. CONCLUSÃO.....	27
5. REFERÊNCIAS	28

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, através da inovação tecnológica e crescente industrialização, bem como da urbanização desordenada e da exploração demográfica nas grandes metrópoles, altas taxas de poluentes atmosféricos vêm sendo emitidos como produto residuário da atividade humana, com consequentes efeitos danosos à vida (MOTTA e MENDES, 1995; ARBEX et al., 2012) em decorrência da degradação da qualidade do ar em diversas regiões (ANDRADE et al., 2017). Tais emissões, associadas às atividades antropogênicas, podem ser atribuídas à quatro categorias de fontes poluentes: queima de combustíveis fósseis, processos industriais, fontes fugitivas não industriais (como poeira de estradas, erosão eólica de terras agrícolas, construções, etc.) e fontes móveis (automóveis, motocicletas, etc.) (SEINFELD e PANDIS, 1998). Logo, ao longo dos últimos anos, vem crescendo a preocupação da população acerca dos possíveis efeitos adversos causados pela exposição à poluição do ar, particularmente nos grandes centros urbanos (GOUVEIA et al., 2003).

Apesar de alguns de seus efeitos terem sido reportados desde a antiguidade, somente com a revolução industrial a poluição do ar passou a atingir a população em grandes proporções. Segundo Motta et al. (2021), os dados de monitoramento da qualidade do ar propiciaram, nas décadas de 1980 e 1990, uma série de estudos epidemiológicos destacando o conhecimento acerca dos efeitos adversos da poluição do ar para a saúde humana. De acordo com o Portal de Dados de Poluição do Ar (OMS, 2022), 6,7 milhões de mortes a cada ano são causadas pela exposição à poluição do ar ambiente e doméstico e grande parte da população mundial vive em locais onde os níveis de poluição do ar excedem os limites das diretrizes da OMS.

Estudos realizados pela OMS (2022), revelaram uma forte ligação entre a exposição à poluição do ar interna e externa e doenças cardiovasculares, como derrames e doenças cardíacas isquêmicas, bem como alguns tipos de câncer. Além disso, estudos sobre os efeitos da poluição do ar na saúde encontraram associações significativas com a mortalidade infantil e a mortalidade em idosos, além de hospitalizações de crianças e adultos por problemas respiratórios agudos (GOUVEIA et al., 2003).

Atualmente, aproximadamente 50% da população do planeta vivem em cidades e aglomerados urbanos e estão expostas a níveis progressivamente maiores de poluentes do ar (ARBEX et al., 2012), o que levou a proposição de medidas para o monitoramento e controle da poluição atmosférica em diversas regiões do mundo. No Brasil, por exemplo, diante dos elevados índices de industrialização e urbanização verificados, desde a década de 70, foram implementadas medidas de controle da poluição do ar, principalmente com foco nas emissões de poluentes atmosféricos provenientes das indústrias e dos veículos automotores (CAVALCANTI, 2010).

Neste contexto, em 1986, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) instituiu a partir da Resolução nº 18, de 6 de maio de 1986, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Este programa impôs o estabelecimento de limites para as emissões de poluentes atmosféricos por veículos automotores para atender os padrões de qualidade do ar, induzindo assim a melhorias tecnológicas dos processos de fabricação e verificação para que os veículos e os motores estivessem de acordo com os limites estipulados através de testes padronizados com um combustível de referência (SZWARCFITER, et al., 2004). Com a implementação dessas e de outras normas que as seguiram, o PROCONVE passou por várias fases que reduziram paulatinamente os limites de emissão de poluentes por veículos leves e pesados (IBAMA, 2016). A Tabela 1 dispõe dos limites de emissão de monóxido de carbono (CO) e material particulado (MP) de todas as fases para veículos leves (“L”) e pesados (“P”), assim como os anos em que determinada fase entrou em vigor. Apenas os limites de CO e MP são apresentados uma vez que estes são o foco do estudo.

Tabela 1: Fases do PROCONVE para os poluentes CO e MP de veículos leves e pesados.

Veículos leves	Anos	Poluentes (g/km)		Veículos pesados	Anos	Poluentes (g/km)	
		CO	MP			CO	MP
L1	1988 – 1991	24,0	⁽¹⁾ n.a.	P1	1989 – 1993	14,0	⁽¹⁾ n.a.
L2	1992 – 1996	12,0	⁽¹⁾ n.a.	P2	1994 – 1995	11,2	0,60
L3	1997 – 2004	2,0	0,05	P3	1996 – 1999	4,9	0,40
L4	2005 – 2008	2,0	0,05	P4	2000 – 2004	4,0	0,15
L5	2009 – 2013	2,0	0,05	P5	2005 – 2008	2,1	0,10
L6	2014 – 2021	1,3	0,025	P6	2009 – 2011	1,5	0,02
L7	2022 – 2023	1,0	0,006	P7	2012 – 2021	1,5	0,002
L8	2023 – 2025	⁽¹⁾ n.a.	⁽¹⁾ n.a.	P8	2022 - atual	1,5	0,0016

⁽¹⁾n.a.: não se aplica

Fonte: CETESB.

Vale ressaltar que após a primeira fase do PROCONVE em 1992, os poluentes regulamentados apresentaram redução de aproximadamente 70% nas emissões para a RMSP (CARVALHO et al., 2015). Para os veículos leves, os limites de emissão de monóxido de carbono (CO) foram reduzidos de $24,0 \text{ g.km}^{-1}$ na fase L1 do PROCONVE para $1,3 \text{ g.km}^{-1}$ na fase L6 e o material particulado caiu de $0,05 \text{ g.km}^{-1}$ para $0,025 \text{ g.km}^{-1}$ entre as fases L3 (terceira fase para veículos leves) e L6 (DIAS, BALES e SILVA, 2021). As determinações da Resolução do Conama nº18 de 1986 foram reforçadas pela Lei 8.723, de 28 de outubro de 1993, que estabeleceu a redução dos níveis de emissão de CO, óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, fuligem, material particulado e outros compostos nos veículos comercializados no país (IBAMA, 2016).

Em 2018, novas fases do PROCONVE para veículos leves (L7 e L8) foram estabelecidas (Resolução CONAMA 492, de 20 de dezembro de 2018) com novos limites máximos de emissão de poluentes. Para os veículos pesados, segundo o CONAMA (2020), os óxidos de nitrogênio (NO_x) diminuíram de $14,4 \text{ g.kWh}^{-1}$ na fase P2 para $0,4 \text{ g.kWh}^{-1}$ durante a fase P8, obtendo uma redução de 86% ao decorrer da implementação do PROCONVE. Para o material particulado (MP), os resultados se mostraram ainda melhores, com redução de 95% durante todo o programa, na fase P3 a média de emissão de MP era de $0,4 \text{ g.kWh}^{-1}$, já para a fase P8 o valor é de apenas $0,01 \text{ g.kWh}^{-1}$.

Outra ação importante para a redução de poluição atmosférica associada com a frota veicular no Brasil foi a criação do Programa Nacional do Álcool, conhecido como “Proálcool”, iniciado em 1975 para estimular o uso do etanol como combustível. Stolf e Oliveira (2020) destacaram em uma importante revisão crítica toda a problemática no qual levou a criação do programa quando, embora a decisão de criar o Proálcool tenha se baseado na crise dos altos preços do petróleo, o contínuo e extraordinário processo de desenvolvimento tecnológico (1960-1975) deu o suporte necessário a essa decisão. Seu objetivo consistiu em intensificar a produção de etanol para que fosse usado como substituto da gasolina, através do uso de uma mistura de etanol e gasolina (gasool), evoluindo a tecnologia nacional, proporcionando crescimento interno e reduzindo a dependência de combustíveis estrangeiros

(ANDRADE et al., 2017). O Proálcool passou por fases distintas. Na primeira, por exemplo, entre 1975 e 1979, estimulou-se a produção de álcool “anidro”, para uso como aditivo à gasolina em proporção até 20%, variável de acordo com a disponibilidade. Durante esse período, o nível absoluto de emissões de CO no Brasil aumentou. No entanto, a emissão de CO do setor transportes sofreu redução de 7,75% (MORIZONO et al., 2018). Esse programa teve como efeito colateral o aumento da área de cultivo de cana-de-açúcar e queima de biomassa a partir do procedimento agrícola de queima das folhas e bainhas, antes da colheita (ANDRADE et al., 2017). Na atualidade, no Brasil, de acordo com a Lei 10.203/01, a gasolina aditivada, assim como a comum, recebe entre 20% e 24% de álcool etílico anidro combustível. Em 2006, a Resolução 35 da Agência Nacional do Petróleo (ANP) fixou em 23% o percentual de mistura de álcool na gasolina.

Após a instauração do PROCONVE, o CONAMA, através da Resolução nº 297 de 26 de fevereiro de 2002, implementou também o PROMOT (Programa de controle da poluição do ar por motocicletas, ciclomotores e similares. Além dos programas para controle das emissões veiculares, em 15 de junho de 1989 seguindo a Resolução CONAMA nº05, foi criado o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR) como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar das populações com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do país de forma ambientalmente segura (MOTTA et al., 2021). A estratégia básica do PRONAR foi limitar, à nível nacional, as emissões (veiculares e industriais), por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos padrões nacionais de qualidade do ar (PNQA) como ação complementar de controle (CONAMA, 1989).

Os PNQA foram estabelecidos inicialmente em 1990 através da Resolução CONAMA nº 03/90 e atualizados em 2018 a partir da Resolução CONAMA nº 431/2018. A atualização dos PNQA em 2018 seguiu as recomendações da OMS de 2005. Contudo, desde a publicação da resolução, a OMS, em 2021, já publicou novas recomendações com valores ainda mais restritivos do que os padrões finais previstos na Resolução CONAMA nº 431/2018 (OMS, 2021).

No estado de São Paulo, a CETESB realiza o monitoramento da qualidade do ar desde 1972. Nessa época, a qualidade do ar passou a ser divulgada diariamente à população por meio de boletins encaminhados à imprensa (CETESB, 2022). Alguns estudos para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) verificaram que as

concentrações de MP_{10} e outros poluentes associados às emissões veiculares diminuíram ao longo das últimas duas décadas, podendo ser atribuídos a melhorias na tecnologia de controle de emissão de veículos e na qualidade dos combustíveis em uso decorrentes da implementação do PROCONVE (CARVALHO et al., 2015; PÉREZ-MARTÍNEZ, ANDADRE e MIRANDA, 2015). Contudo, é importante destacar que a qualidade do ar é diretamente influenciada pela distribuição e intensidade das emissões de poluentes atmosféricos de origem veicular e industrial (CETESB, 2020), mas também por outros fatores como a topografia, o uso e ocupação do solo, além das condições meteorológicas locais (CARVALHO et al., 2012).

Outra questão importante, como indicado por Andrade et al. (2017) trata dos poluentes secundários, que apesar das políticas públicas já implementadas ainda registram altos valores. Esse resultado também foi observado por Carvalho et al. (2015) que não observou um padrão de queda da concentração de ozônio registrados na RMSP entre 1996 e 2009, ao contrário do verificado para os poluentes primários. Kumar et al. (2016) indicou que a qualidade do ar ainda pode ser melhorada e apontam a necessidade de expansão das linhas de metrô e trens intermunicipais, para que mais regiões de São Paulo possam se conectar, diminuindo a frota de veículos leves em circulação nas ruas. Além disso, os autores indicam que a frota precisa ser modernizada, dando espaço para carros com motores que emitam poluentes abaixo do padrão permitido, uma vez que metade das emissões totais de alguns poluentes são derivados de veículos acima de 10 anos. Uma boa alternativa seria o crescimento da frota de veículos elétricos (VEs). Os VEs já são realidade em diversos países e projeções indicam um crescimento acelerado na sua comercialização nos próximos anos. O Brasil além de assumir uma vantagem comparativa em termos de produção de energia limpa, também exibe outro ponto a ser considerado como vantagem para a comercialização de VEs, o mercado brasileiro é próximo das maiores reservas de lítio do mundo, que é um mineral muito importante para as baterias de íon-lítio, as mais usadas em VEs (RISSO, 2018).

Slovic e Ribeiro (2018) verificaram que para São Paulo, Nova York e Paris, os níveis gerais de poluição atmosférica diminuíram, mas continuam acima das recomendações da OMS. Para o MP_{10} os níveis se mantiveram em torno de $20 \mu g/m^3$ na cidade de Nova York, $35 \mu g/m^3$ para São Paulo e $30 \mu g/m^3$ em Paris, enquanto o nível recomendado pela OMS seria de no máximo $20 \mu g/m^3$. Apesar de todos compartilharem a capacidade tecnológica para desenvolver combustíveis mais limpos

e fomentar modos de transporte não motorizados, as disparidades nas opções de transporte, infraestrutura e distância de deslocamento parecem ter impacto no uso de veículos particulares e nos níveis de poluição.

1.1. Objetivo

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar as concentrações de monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂) e material particulado (MP₁₀) registradas no período de 1987 a 2021 em estações de monitoramento localizadas na RMSP, indicando as tendências verificadas e sua relação com a implantação de políticas públicas para o controle da poluição do ar. Destaca-se que apesar de existirem muitos estudos acerca da qualidade do ar na RMSP, ainda existem lacunas do conhecimento principalmente no que se refere à relação direta entre os dados de emissão e os dados de concentração de poluentes na atmosfera.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo

Localizado na região sudeste do Brasil, segundo o IBGE, o estado de São Paulo ocupa um território de aproximadamente 249.000 km² e 45,9 milhões de habitantes, além de possuir o maior desenvolvimento econômico (agrícola, industrial e serviços) e maior frota automotiva do país (CETESB, 2019). Dentro do Estado, destaca-se a Região Metropolitana de São Paulo (**Figura 1**) com 39 municípios, 7.900 km² de área e aproximadamente 22 milhões de habitantes, sendo considerada atualmente a maior Megacidade da América do Sul. A frota de veículos automotores da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), é estimada em mais de 7 milhões de veículos e a idade média da frota é calculada para 2019 em 10,1 anos, considerando todos os tipos de veículos (CETESB, 2022).

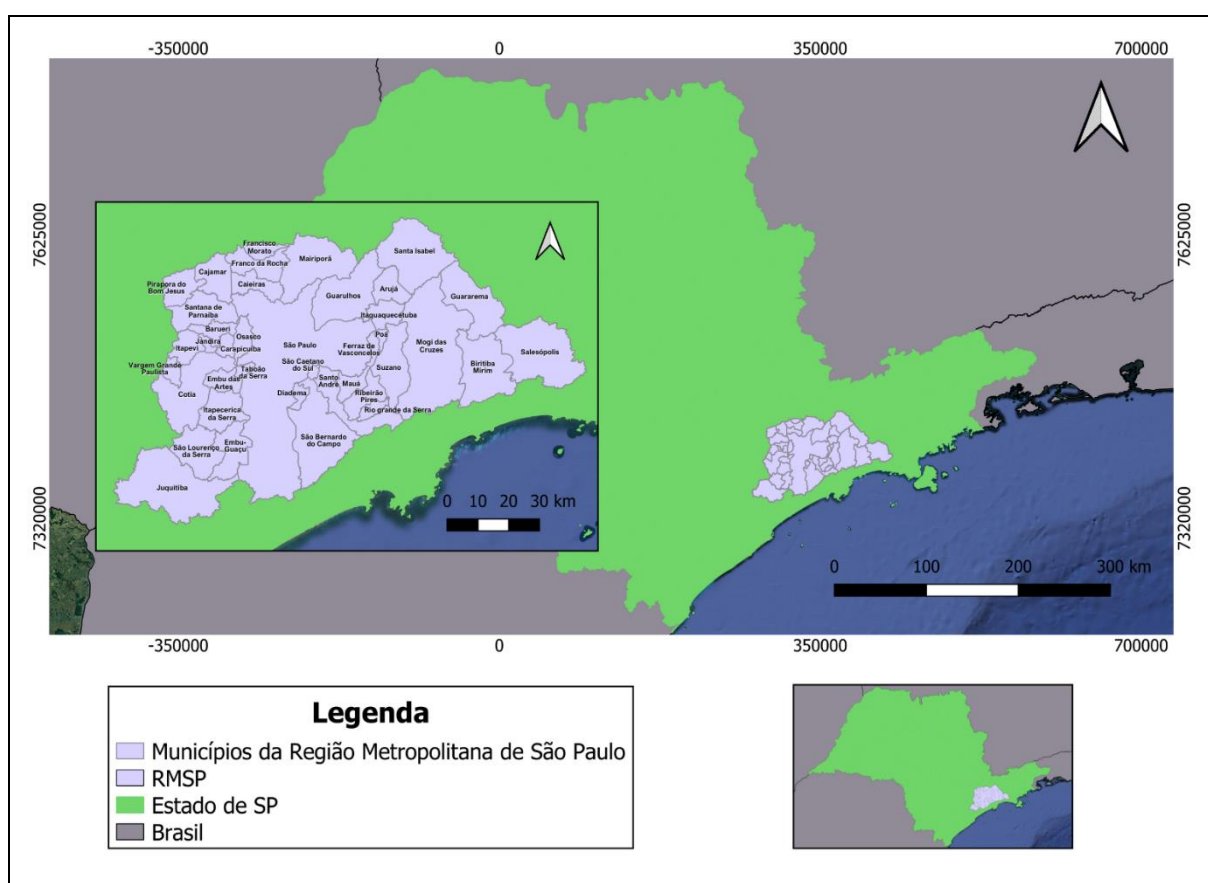


Figura 1: Localização da RMSP e seus municípios dentro do estado.

De acordo com a CETESB (2019), a RMSP é uma das áreas críticas em termos de poluição do ar, causados principalmente em função dos poluentes provenientes dos veículos automotores e polos industriais. Na RMSP, a única informação oficial a respeito das emissões de poluentes atmosféricos é disponibilizada pela CETESB por meio dos relatórios anuais da qualidade do ar. No caso, apenas um valor de emissão total, em toneladas por ano, para toda a região metropolitana é divulgado para cada um dos compostos considerados, não sendo fornecida a distribuição espacial das fontes (CARVALHO, 2010).

2.2. Climatologia

A fim de caracterizar os aspectos climatológicos da RMSP, as normais climatológicas do INMET foram analisadas. Na **Figura 2**, as médias climatológicas referentes a temperatura média, umidade relativa, pressão atmosférica e precipitação acumulada são apresentadas. O estado de São Paulo exhibe estações bem definidas, com o clima chuvoso predominante durante os meses de verão e clima seco durante os meses de inverno. A distribuição da precipitação ao longo do ano é determinada pela influência de sistemas meteorológicos, tais como: frentes frias, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), linhas de instabilidade e brisa marítima (BATISTA, 2012; Reboita et al, 2012). Em relação à temperatura do ar ao longo do ano, durante o verão, a média fica próxima a 24°C e, no inverno, em torno de 17,5°C. As estações de transição (outono e primavera) apresentam as temperaturas médias mais amenas. Analisando a **Figura 2** (b) e (d) em conjunto, podemos observar que os meses com menor umidade relativa são os meses de julho, agosto e setembro, sendo agosto, o mês em que menos registrou-se precipitação. A pressão atmosférica revela maiores médias durante os meses de inverno, quando o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) está deslocado para oeste, atuando de forma mais significada na região sudeste do Brasil (Reboita et al., 2012).

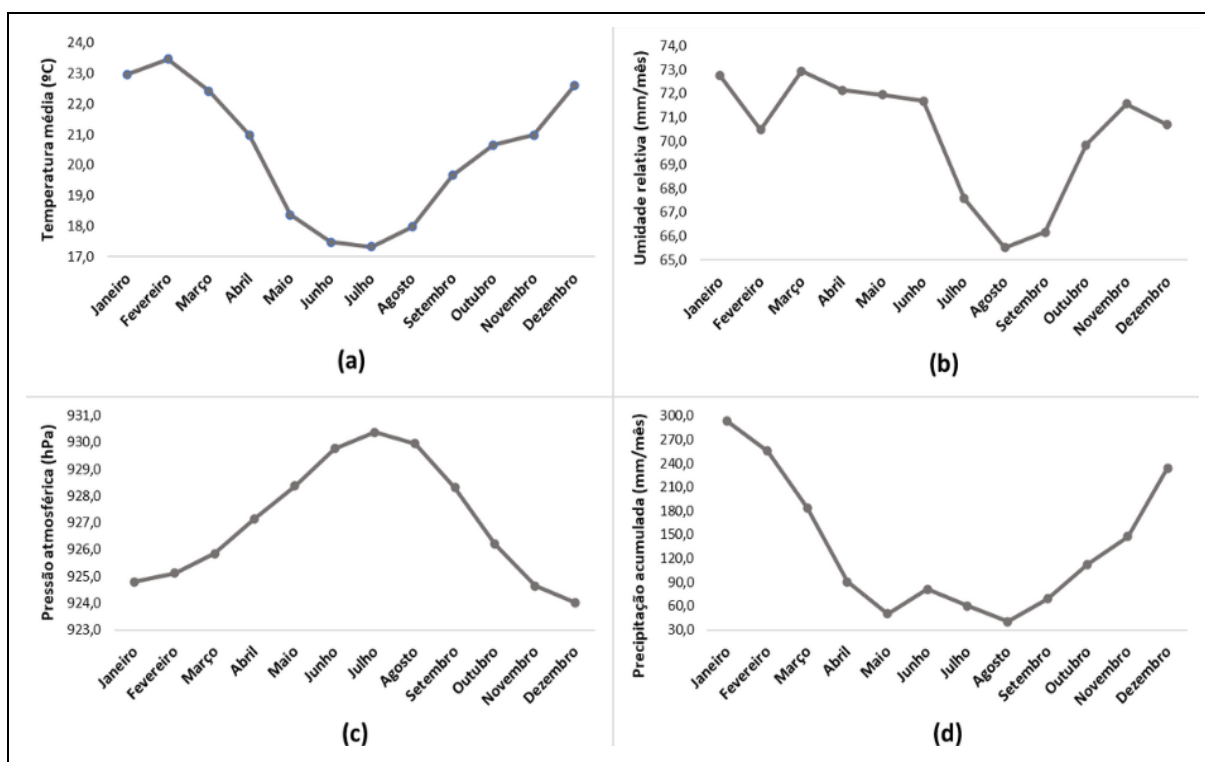


Figura 2: Médias climatológicas registrados em estações de monitoramento da CETESB na RMSP no período de 2007 a 2021: (a) Temperatura média (°C); (b) Umidade relativa (mm/mês); (c) Pressão atmosférica (hPa); (d) Precipitação acumulada (mm/mês).

Ressalta-se também que o vento, importante variável quanto a análise da dispersão de poluentes, na RMSP é considerado entre fraco a moderado, variando aproximadamente de 0 a 6 m/s (mais intenso durante o dia e mais calmo à noite) e sofre a influência de sistemas meteorológicos (brisa marítima, aproximação de frentes frias, etc. (BATISTA, 2012).

2.3. Dados utilizados

Para este estudo foram extraídos dados das estações automáticas e convencionais que compõe a rede de monitoramento da qualidade do ar da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) através do sistema QUALAR (<https://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do>). Foram considerados dados de concentração de Monóxido de Carbono (CO), material particulado com diâmetro inferior a 10 μm (MP₁₀) e dióxido de enxofre (SO₂) provenientes de 30 estações de monitoramento localizadas na RMSP.

O CO é um excelente indicador da combustão incompleta de veículos automotores, sendo esta, sua principal fonte de poluição atmosférica. O SO₂ é um ótimo indicador de poluição industrial e de veículos pesados, tendo como uma de suas principais fontes de emissão a queima de diesel, podendo levar por exemplo à danos à vegetação e formação de chuva ácida, que consiste em uma consequência da poluição atmosférica, uma vez que em sua composição química estão presentes dentre outros elementos, compostos da queima de combustíveis. Já o MP₁₀ tem como fontes principais de poluição os processos de combustão (industriais e veículos automotores), poeira ressuspensa e, aerossol secundário, podendo deteriorar a visibilidade e contaminar solo e águas (CETESB, 2023).

O período de dados considerados para a análise foi de 1987 a 2021. A lista das estações e parâmetros utilizados pode ser observada na **Tabela 2** e a distribuição espacial das estações na RMSP pode ser observada na **Figura 3**.

Tabela 2: Estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB, localização e parâmetros analisados.

Estações	Latitude	Longitude	CO	MP ₁₀	SO ₂
Capão Redondo	-23,667	-46,780		X	
Carapicuíba	-23,531	-46,836	X		
Centro	-23,547	-46,642	X	X	
Cerqueira César	-23,553	-46,673	X	X	X
Cidade Universitária USP – IPEN	-23,566	-46,737	X		
Congonhas	-23,616	-46,663	X	X	X
Diadema	-23,686	-46,611	X	X	
Grajaú – Parelheiros	-23,776	-46,685	X	X	
Guarulhos	-23,462	-46,498		X	
Guarulhos – Paço Municipal	-23,455	-46,518		X	
Guarulhos – Pimentas	-23,440	-46,410	X	X	X
Ibirapuera	-23,592	-46,661	X	X	
Interlagos	-23,680	-46,675		X	X
Itaim Paulista	-23,501	-46,421		X	
Marginal Tietê - Ponte Remédios	-23,519	-46,743	X	X	X
Mauá	-23,668	-46,466		X	
Mooca	-23,550	-46,600	X	X	
Nossa Senhora do Ó	-23,477	-46,692		X	
Osasco	-23,527	-46,792	X	X	X
Parque Dom Pedro II	-23,545	-46,628	X	X	
Pinheiros	-23,561	-46,685	X	X	
Santana	-23,514	-46,629		X	
Santo Amaro	-23,655	-46,710	X	X	
Santo André – Capuava	-23,640	-46,491		X	X

Santo André – Centro	-23,645	-46,537	X	X	
Santo André – Paço Municipal	-23,657	-46,531	X	X	
São Bernardo do Campo – Centro	-23,699	-46,546	X		
São Bernardo do Campo – Paulicéia	-23,671	-46,584		X	
São Caetano do Sul	-23,618	-46,556	X	X	X
Taboão da Serra	-23,609	-46,758	X	X	

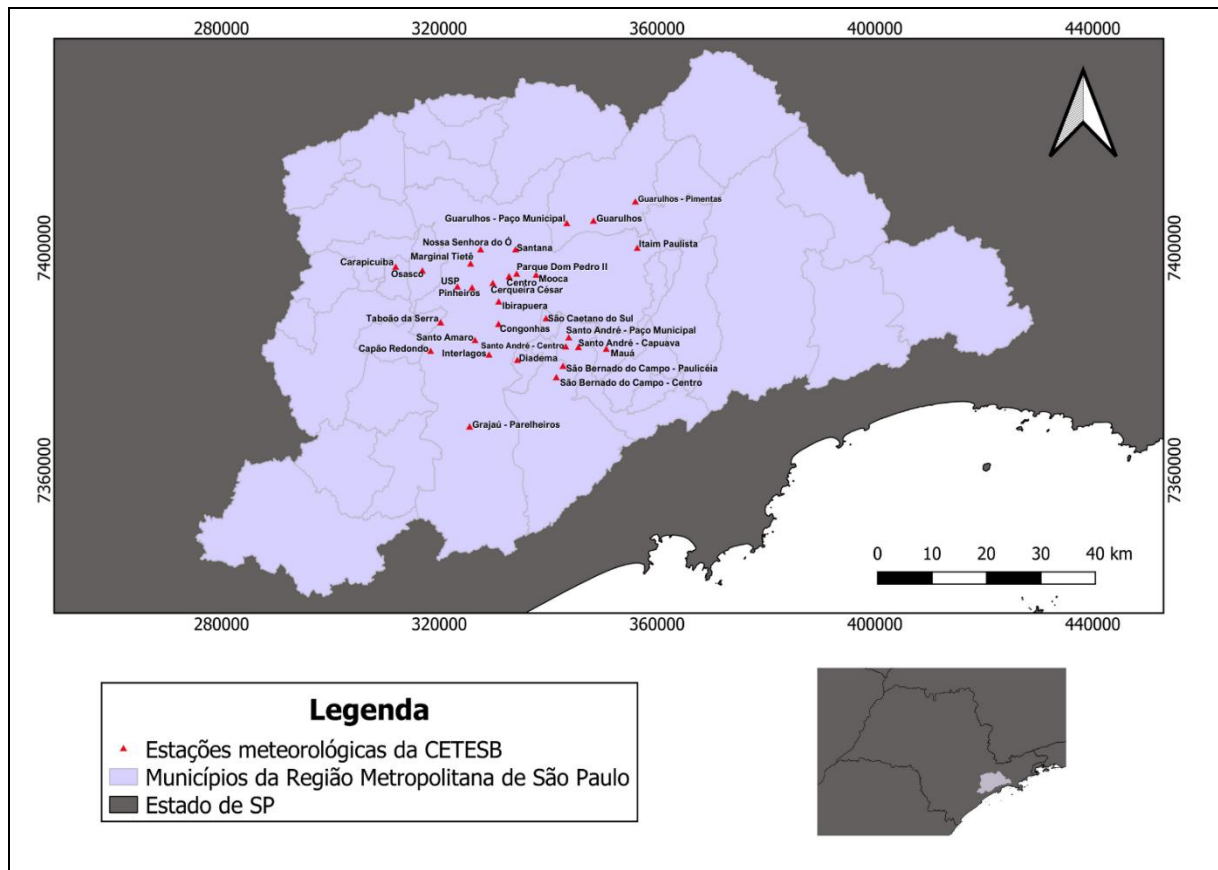


Figura 3: Estações da rede de monitoramento da qualidade do ar da CETESB na RMSP.

A partir dos relatórios anuais da CETESB publicados entre 1987 e 2021, foram obtidos os dados anuais referentes à população, quantidade de veículos e os dados de emissão estimada dos principais poluentes atmosféricos de acordo com as fontes de emissão para o período do estudo dentro da RMSP. Os relatórios utilizados são disponibilizados a partir do site: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Para a realização do mapa de mancha urbana foram utilizados os dados provenientes do Map Biomas (<https://mapbiomas.org/>).

2.4. Análises realizadas

Através dos relatórios da CETESB, foram analisados os dados da evolução da frota veicular e crescimento populacional, entre os anos de 1987 e 2021. Com os dados extraídos do MapBiomas, através do Google Earth Engine, foram plotados mapas no QGis para análise da evolução da mancha urbana na região.

Também foram realizadas análises das séries históricas dos dados de emissão estimado pela CETESB considerados entre os anos de 1987 e 2021, quando disponíveis e concentração dos poluentes considerados entre os anos de 1998 e 2021. Para isso, foram calculadas as médias anuais da concentração dos poluentes para a verificação do comportamento médio ao longo dos anos. O cálculo das médias anuais foi realizado apenas para as estações que apresentaram, no mínimo, 75% de dados válidos ao longo do ano. Vale ressaltar que, para o CO e MP₁₀, a partir do ano de 2010, novas metodologias para o cálculo de emissão dos poluentes foram adotadas pela CETESB, causando queda abrupta nos valores de emissão dos poluentes e inviabilizando a análise da série histórica. Por isso, os anos anteriores a 2010 foram descartados somente para a análise de emissão de CO e MP₁₀. Calculou-se também médias das concentrações de poluentes de acordo com cada fase do PROCONVE para a verificação do impacto destas na qualidade do ar. A comparação entre os dados de concentração de poluentes e a Resolução CONAMA 490/2018 também foi realizada.

A análise de tendências foi calculada a partir do Teste de Mann-Kendall (KENDALL, 1975; MANN, 1945). O teste consiste em um método sequencial, não parametrizado e robusto, usado para determinar se uma série de dados possui ou não uma tendência temporal de alteração estatística significativa e por se tratar de um teste não parametrizado, não necessita que os dados tenham uma distribuição normal (YUE et al., 2002), sendo assim, o cálculo é feito para uma série temporal ($X_i, X_{i+1}, \dots, X_n$) resultante de N amostras variáveis aleatórias independentes e distribuídas uniformemente. O somatório dos sinais da diferença entre os valores (X_i) e (X_j) resultam no coeficiente de Mann-Kendall (S)

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sin}al(X_j - X_i)$$

Onde,

$$\text{sin}al(X_j - X_i) = \{1, \text{se } (X_j - X_i) > 0; 0, \text{se } (X_j - X_i) = 0; -1, \text{se } (X_j - X_i) < 0$$

Quando

$S \{ > 0, \text{tendência de aumento} ; < 0, \text{tendência de diminuição}$

Os valores de Variância (Var (S)) e o índice de distribuição normal (Z) são obtidos da seguinte forma

$$Var(S) = \frac{n(n-2)(2m+5) - \sum_{j=i+1}^n tj(i)(i-1)(2i+5)}{18}$$

$$Z = \left\{ \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, \text{ se } S > 0; 0, \text{ se } S = 0; \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, \text{ se } S < 0 \right.$$

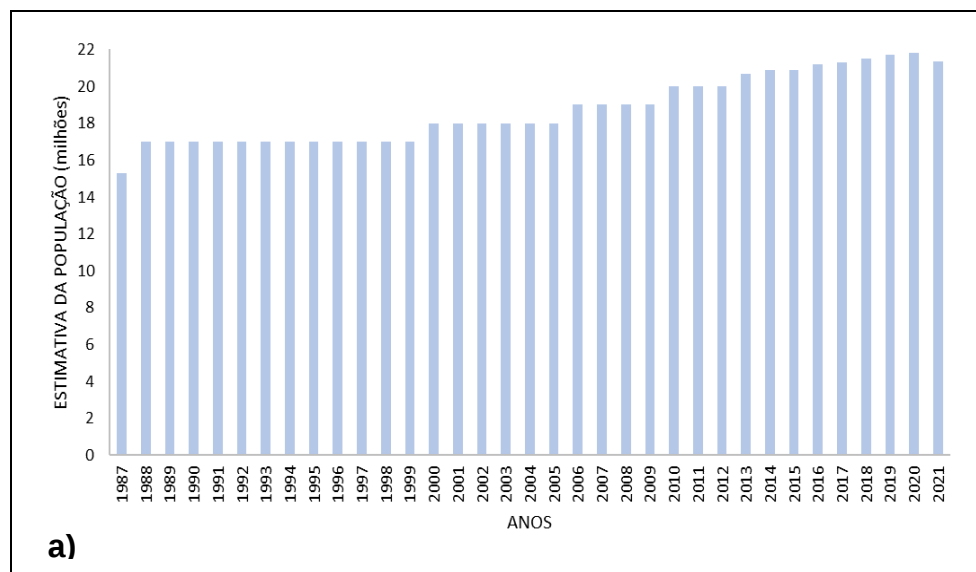
Rejeita-se a hipótese H0 (hipótese nula) quando $Z > Z_{\alpha/2}$, sendo α o nível de significância. Desta forma, o Teste de Mann-Kendall será utilizado para fixar se a série em questão possui uma tendência temporal estatisticamente significativa.

Vale ressaltar que a análise de Mann-Kendall foi calculada a partir das taxas de emissão estimadas pela CETESB e dos dados médios anuais de concentração dos poluentes considerados. A partir desses resultados, utilizando o QGis, foram plotados mapas de distribuição espacial das tendências para as estações específicas consideradas em cada poluente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. O impacto do crescimento populacional e urbano nas taxas de emissão de poluentes atmosféricos

Em média, a RMSP representa cerca de 47% da população de todo o Estado de São Paulo e aproximadamente 10% da população de todo o território Brasileiro (IBGE, 2022). Nota-se a partir da **Figura 4a**, que o crescimento da população nos últimos 35 anos (1987 – 2021) foi significativo e que atualmente a população da RMSP supera os 21,9 milhões de habitantes (IBGE, 2022). O crescimento da frota veicular **Figura 4b** também é bastante nítido ao longo da série, contudo, nos últimos 10 anos verifica-se uma queda na taxa de crescimento. Segundo dados do IBGE (2022) a frota da RMSP representa por volta de 42% de toda frota presente no Estado de São Paulo, saltando de 1,8 milhões de veículos em 1987 para 7 milhões em 2021.



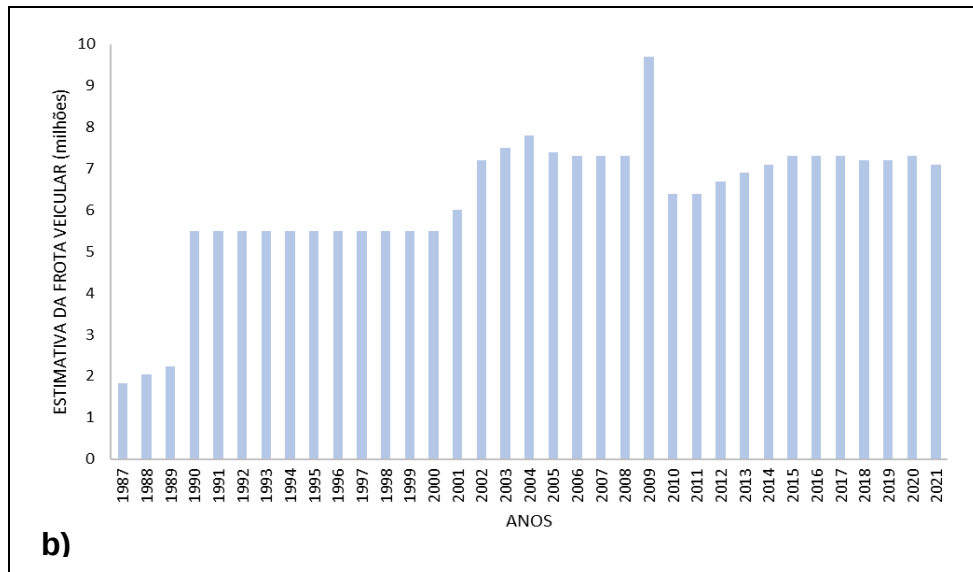
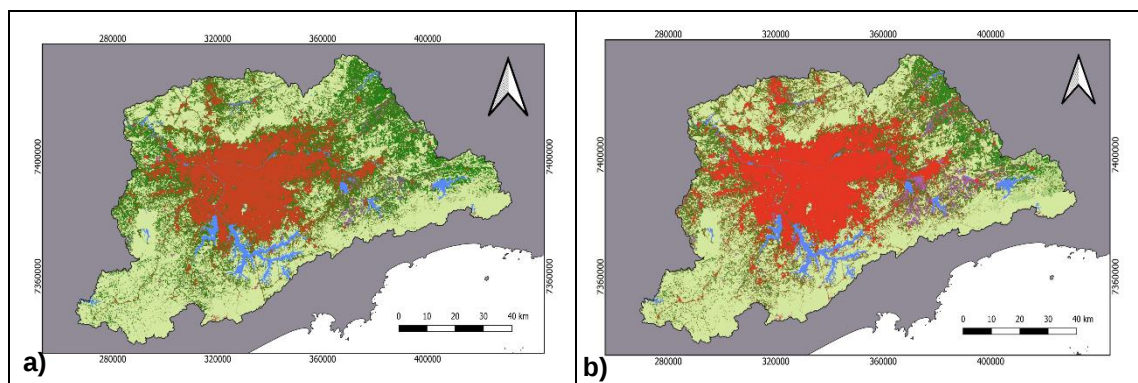


Figura 4: Estimativa da (a) população e (b) frota veicular na RMSP segundo dados da CETESB (1987 a 2021)

Complementando estes dados, o crescimento urbano da região também fica claro a partir dos dados de uso e ocupação do solo (**Figura 5**). A cidade de São Paulo, localizada na porção central da região, é onde concentra-se a maior área urbana da região (cor vermelha). Em 1990 (**Figura 5a**), observa-se que todo o entorno da região possui uma grande área de vegetação (cor verde) e áreas não vegetadas (urbanas) principalmente no centro da RMSP. Para o ano de 2000 (**Figura 5b**), nota-se um aumento nas regiões com atividades agropecuárias (cor lilás), além disso, verifica-se uma relação entre a diminuição de vegetação e aumento da área não vegetada. Nos anos seguintes (**Figura 5c e Figura 5d**), a análise se manteve similar. A área não vegetada cresce ainda mais, ramificando-se para as regiões de entorno da RMSP, com um crescimento na região norte e consequentemente diminuindo ainda mais as porções de vegetação. Outro aumento notável é o da agropecuária, ficando ainda mais presente em toda região leste nos anos de 2010 e 2021.



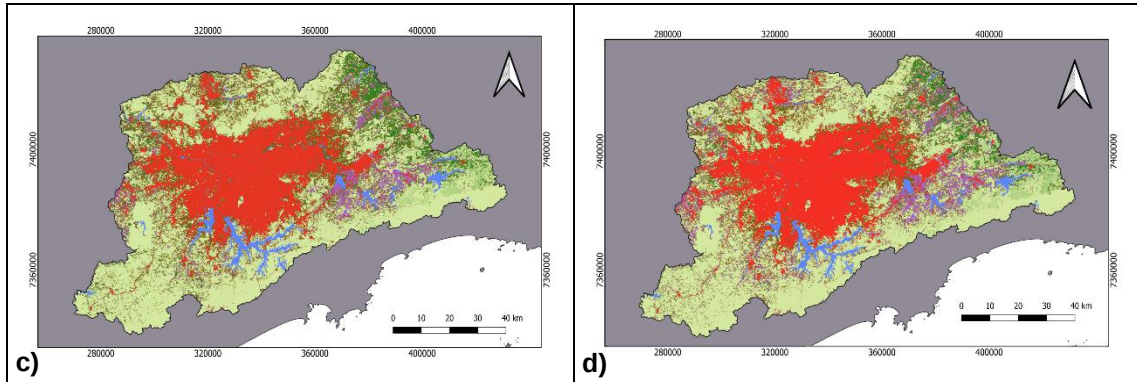


Figura 5: Evolução da mancha urbana na RMSP para os anos de 1990, 2000, 2010 e 2021, respectivamente.

O crescimento da área urbana, aumento da população e da frota veicular é acompanhado por um aumento das emissões de poluentes. A **Figura 6** apresenta a evolução das emissões de poluentes atmosféricos entre os anos de 2010 e 2021 para o CO e MP₁₀ e entre 1998 e 2021 para o SO₂. Os valores obtidos a partir da aplicação do teste de Mann-Kendall aos dados de emissão também podem ser observados na **Figura 6**.

Entre 2010 e 2021, a emissão do CO e MP₁₀ diminuiu ao decorrer dos anos. Quando observado o comportamento das emissões de CO, fica nítido a diminuição de emissões entre o início da série e o fim, onde, em 2010 foram emitidas aproximadamente 160 toneladas/ano e para o ano de 2010 decai para 120 toneladas/ano. Para a análise do teste de Mann-Kendall, observa-se o valor de S e P, o valor de S sendo negativo, indica uma tendência de diminuição e quanto ao valor de P, ele precisa ser menor que 0,05 para possuir significância estatística. Dessa forma o teste confirma o que é apresentado na Figura, uma vez que analisando seu resultado podemos determinar que a série possui uma tendência negativa, porém, para este poluente, sem significância estatística. Para os anos de 2014 e 2015, um aumento é registrado nos dados, podendo ser relacionado com o aumento de veículos leves circulantes em toda RMSP, de 2016 em diante as emissões voltam a diminuir. Os resultados encontrados entram em contradição com a projeção feita por Carvalho et al. (2015), uma vez que notava-se uma alta taxa de crescimento na frota veicular leve, frota essa responsável por aproximadamente 90% das emissões de CO, o que poderia impedir a redução do poluente nos anos subsequentes.

Para o MP₁₀ os primeiros anos mostram uma queda nas emissões. É importante destacar na série que os registros feitos para o ano de 2010 e 2020 são

aproximadamente os mesmos (4,8 toneladas/ano). Nos anos de 2015 e 2016, um aumento é registrado, podendo ser o reflexo do aumento da população registrada em 2014 e consequentemente o crescimento da frota veicular no ano de 2015. Analisando as emissões anteriormente ao aumento registrado no ano de 2015, ou seja, os 5 primeiros anos da série, a média de emissões é de aproximadamente 4,6 toneladas/ano. Leirião (2018) obteve um resultado semelhante quando verificou que entre os anos de 2010 e 2015, há uma tendência de decréscimo nas emissões de MP_{10} , com redução de cerca de 14% nos anos analisados. Posterior a 2015, temos aproximadamente 4,9 toneladas/ano de média de emissão, porém, mesmo com o aumento registrado no valor médio do poluente, após ano de 2016 as concentrações voltam a assumir o comportamento de queda. O teste de Mann-Kendall comprovou através do coeficiente a tendência de diminuição nas.

Para o SO_2 verifica-se com maior nitidez a queda nas emissões ao longo dos anos. Entre 1998 e o 2020 observa-se uma diminuição significativa nas emissões, que variaram de 16 toneladas/ano a 2,8 toneladas/ano. Os maiores registros foram feitos nos anos de 1999 e 2000, com aproximadamente 21 toneladas/ano. As menores emissões, como esperava-se, encontram-se nos últimos anos da série, com 4 toneladas/ano em 2019 e cerca de 2,8 toneladas/ano em 2020. O teste de Mann-Kendall reafirmou o visto em números, uma vez que a tendência encontrada foi de diminuição.

É importante destacar que os últimos anos da pesquisa foram anos em que todo o mundo enfrentou a pandemia de COVID-19, onde foi imposto um bloqueio parcial, impedindo o trânsito de pessoas e principalmente automóveis, desta forma, Silva (2022), pode observar uma redução de 43,3% na concentração de CO, no ano de 2020 e o SO_2 reduziu cerca de 5 a 10% para o mesmo período, segundo o estudo realizado por Alvin (2023). De acordo com Kumari (2020) e Silva (2020), o MP_{10} não sofre grandes reduções para o ano e 2020 em relação aos anteriores.

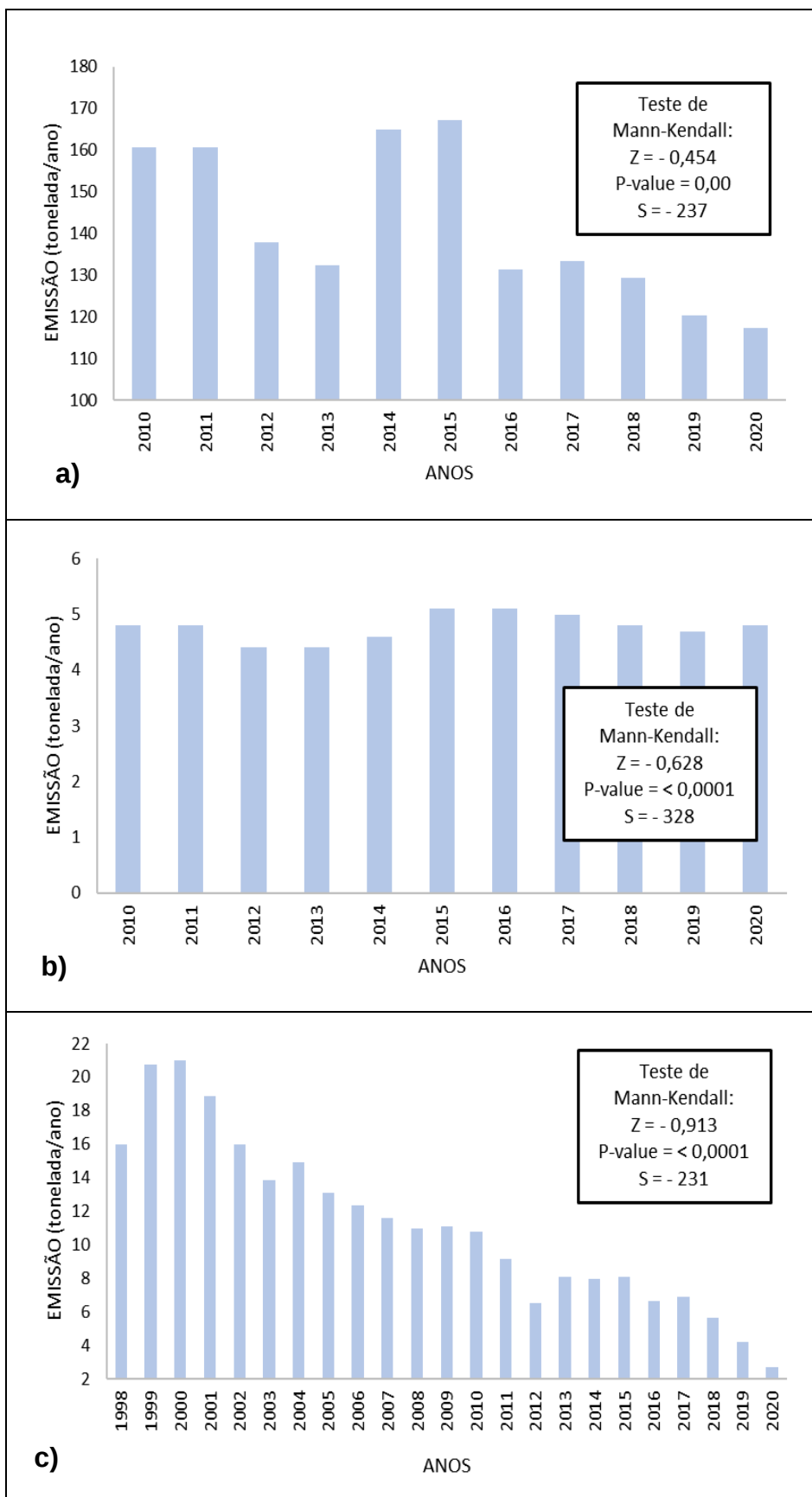


Figura 6: Estimativa de evolução das emissões de (a) CO, (b) MP₁₀ e (c) SO₂ respectivamente.

3.2. Evolução da qualidade do ar

As médias anuais de concentrações de CO, MP₁₀ e SO₂ assim como os limites estabelecidos na Resolução CONAMA 03/1990 (válida até 2017) e Resolução CONAMA 491/2018 (válida a partir de 2018), estão apresentadas na **Figura 7**. Quando observadas as concentrações e os limites impostos pela CONAMA, vale ressaltar que em 2008, o Estado de São Paulo iniciou um processo de revisão dos padrões de qualidade do ar, baseando-se nas diretrizes estabelecidas pela OMS em 2005. Este processo resultou na publicação do Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013, estabelecendo novos padrões de qualidade do ar (CETESB, 2022) e, adotando o padrão final (PF) para alguns poluentes. Os mesmos padrões seriam posteriormente adotados pela Resolução CONAMA 491/2018, sendo este o utilizado para as comparações.

A tendência de queda nas concentrações médias anuais de CO é nítida na **Figura 7a**. A maior concentração registrada foi durante o ano de 1998, com 17,4 ppm/ano. Entre os anos de 1999 e 2004 observa-se valores bem próximos de aproximadamente 12,5 ppm/ano. Após 2005, pode ser observada uma grande queda nas concentrações, que mantem-se até o último ano da série. Pérez-Martínez, Andrade e Miranda (2015) destacam uma diminuição de aproximadamente 35% e 87% para o CO e MP₁₀, entre os anos de 2000 e 2013.

Os padrões adotados pelas Resoluções da CONAMA para o CO, permaneceram os mesmo durante todos os anos de interesse, não sendo adotados padrões primários e secundários, o mesmo valor do padrão final é apresentado em ambas as Resoluções. Foram registradas ultrapassagens consecutivas do PF somente nos primeiros anos de estudo (1998 a 2004), posterior a estes, nenhuma concentração foi maior e/ou chegou ao limiar próximo, pelo contrário, os valores apresentam-se extremamente abaixo dos limites impostos, indicando ao PROCONVE a responsabilidade de ter contribuído com as quedas registradas. Carvalho et al. (2015) associa a mesma responsabilidade ao PROCONVE, uma vez que a concentração máxima de CO diminuiu anualmente cerca de 4% entre os anos de 1996 – 2009. Desta mesma forma, Pérez-Martínez, Andrade e Miranda (2015) atribui as normas mais restritivas do PROCONVE a diminuição ocorrida no início dos anos 2000, mas relaciona esta diminuição também com as melhorias nas tecnologias veiculares.

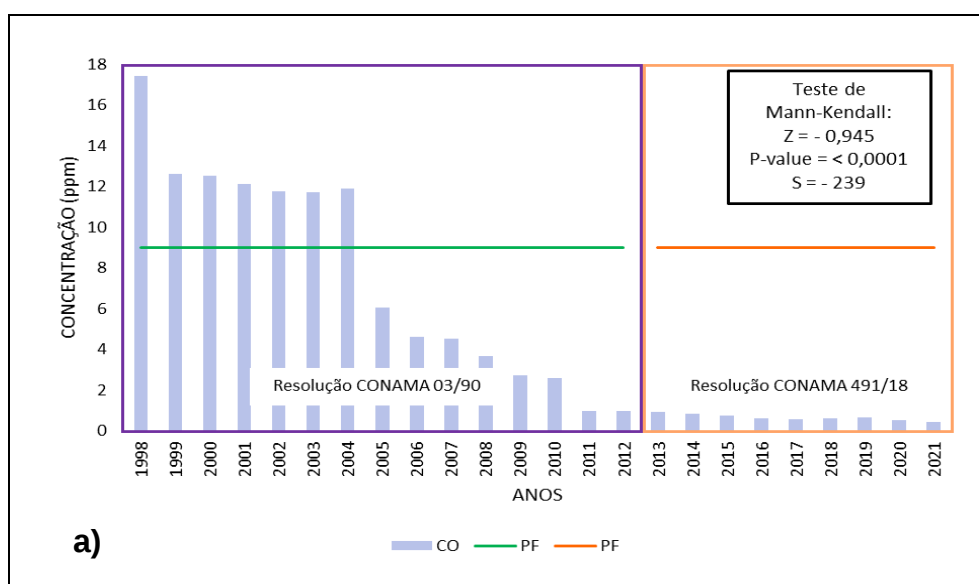
Os limites estabelecidos pelo PROCONVE (**Tabela 3**) para o CO entre as fases L3 e L4 caíram 83%, entre as fases L4 e L5 os limites não foram alterados e entre as fases L5 e L6 a diminuição foi de aproximadamente 35%. A análise do teste e Mann-Kendall corrobora com os resultados encontrados nas figuras, a tendência de diminuição é comprovada, uma vez que o coeficiente de Mann-Kendall (S) e o valor P se mantem abaixo de zero, satisfazendo as condições para tendência de queda, assim como os resultados encontrados por Pelaez et al. (2020) para a cidade de São Paulo.

Analisando as concentrações médias anuais de MP₁₀ (**Figura 7b**) a maior concentração registrada é verificada no ano de 1998, com cerca de 53 ug/m³ e a menor concentração se deu no ano de 2021, sendo aproximadamente 26 ug/m³. Observando a série é possível verificar a diminuição das concentrações, porém com alguns aumentos registrados em anos específicos, como de 2006 para 2007, passando de 37 ug/m³ para 41 ug/m³, de 2009 a 2011, aumento de 32 ug/m³ para 38 ug/m³ e levemente de 2013 para 2014, onde a concentração era de 34 ug/m³ e subiu para aproximadamente 36 ug/m³. Quando comparadas as concentrações com as Resoluções CONAMA, para o MP₁₀ os padrões intermediários PI-1 e PI-2 foram superados entre os anos de 1998 e 2002, seguindo a Resolução CONAMA 03/90. Após a Resolução CONAMA 481/18 ser implementada, foram atribuídos valores mais baixos para os padrões PI-1 e PI-2, além dos padrões previstos para PI-3 e PF. O padrão PI-2 foi novamente superado no ano de 2014, além dele, o padrão PI-3 foi ultrapassado entre os anos de 2013 e 2016, onde o ano de 2017 não registrou ultrapassagem, porém a concentração registrou o mesmo valor do padrão. O PF foi superado em todos os anos segundo a Resolução CONAMA 481/18 (2013 a 2021). Pelaez et al. (2020) constatou que os padrões estipulados pela OMS também foram ultrapassados, entre os anos de 2010 e 2017, além disso, uma inclinação negativa na tendência de -1,57 ug/m³ por ano foi identificada para a cidade de São Paulo. Quando observados os limites imposto pelo PROCONVE através da **Tabela 3**, os limites padrões se mantiveram os mesmos, só ocorrendo mudança entre as fases L5 e L6, decaindo cerca de 50% nos limites máximos permitidos. Apesar dos padrões serem ultrapassados em diversas vezes, o MP₁₀ apresenta tendência de diminuição, sendo comprovado através do teste de Mann-Kendall.

Assim como as comparações impostas entre as Resoluções CONAMA e os poluentes CO e MP₁₀, comprovaram a eficácia dos limites impostos ao reduzir a concentração do CO e não obter a mesma excelência com o MP₁₀ em todos os anos

da série, Brender et al. (2020), comparou as Resoluções CONAMA com os mesmos poluentes, porém para uma estação em específico, Marginal Tietê – Ponte dos Remédios, entre os anos de 2015 a 2019. Comprovando que as concentrações de CO ficaram dentro do limite máximo permitido. E para o MP10 os dados oscilaram, ultrapassando o limite máximo estipulado pelo CONAMA em 42,58% dos dias analisados.

As concentrações de SO₂ (**Figura 7c**) desde de o início da série até o ano de 2004, sofreram oscilações, contudo, a partir de 2004 as tendências de queda foram mais significativas. O poluente apresentou valores bem abaixo dos recomendados pelas Resoluções CONAMA. Resultados similares foram encontrados por Pelaez et al. (2020). Vale destacar que a Resolução CONAMA 415/09 determinou que novas especificações de combustíveis de referência e comerciais fossem estabelecidas, com foco principal na redução dos teores de enxofre da gasolina e do diesel (Carvalho et al. 2013), de acordo com a CETESB (2012), o diesel S50 (50 ppm de enxofre) foi disponibilizado em 2012 para todo o país, sendo substituído pelo diesel S10 (10 ppm de enxofre) no ano seguinte. A utilização do diesel de baixo teor de enxofre, impactou diretamente na redução do SO₂, podendo ser observado na (**Figura 7c**), onde valores ainda mais baixos são registrados após o ano de 2013. Assim como os outros poluentes, o resultado do teste de Mann-Kendall apresentou a mesma tendência de diminuição, comprovando a análise apresentada acima.



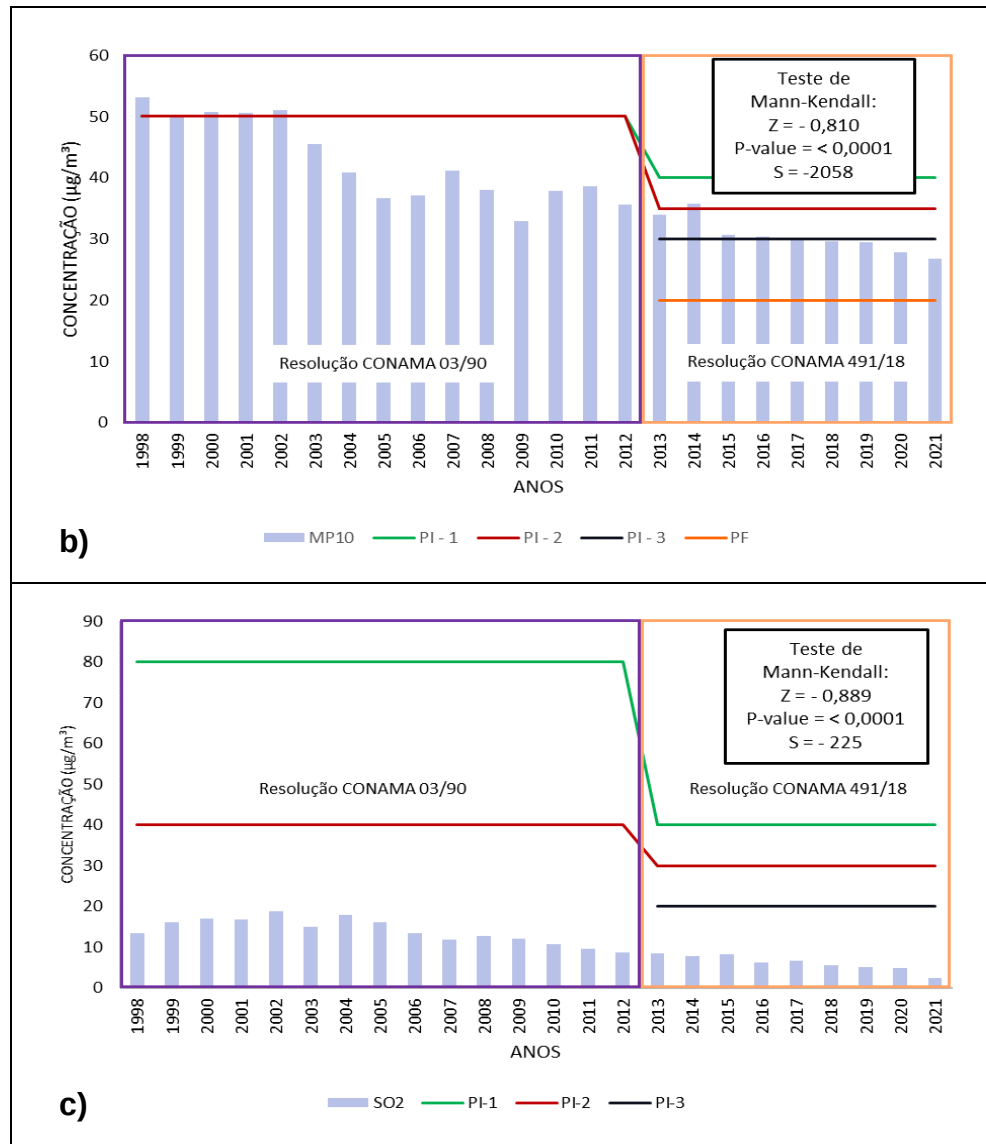


Figura 7: Limites de concentração e resultado do teste de Mann-Kendall: (a) CO; (b) MP₁₀; (c) SO₂.

Para avaliar a influência do PROCONVE, a **Tabela 3** apresenta a média de concentração de CO, MP₁₀ e SO₂, considerando todas as estações de monitoramento na RMSP, durante o período em que cada fase estava em vigor. Todos os poluentes apresentaram percentuais de queda entre as fases, sendo o CO, o poluente com maior percentual dentre os analisados, com uma média de 63% de queda de modo geral.

As quedas percentuais nos limites de CO estipulados pelo PROCONVE entre suas fases são: entre as fases L1 e L2 os limites apresentaram um percentual de queda de 50%, entre L2 e L3 83%, já entre as fases L3 e L5 os limites para o CO permanecem os mesmos, de L5 para L6, obteve 35% de redução e de L6 para L7, 23%. Já para o MP₁₀ os limites do PROCONVE foram estabelecidos inicialmente na fase L3, mantendo-se o mesmo até a fase L5, entre as fases L5 e L6 caiu 50% o limite

e entre as fases L6 e L7, diminuiu ainda mais, com 76% de queda. Os limites para o SO₂ não são estabelecidos nas fases do PROCONVE.

Da fase L3 para a L4 as concentrações de CO caíram cerca de 63%, o MP₁₀ 22% e o SO₂ aproximadamente 18%. Entre as fases L4 e L5, os percentuais foram de 65% e 27% para o CO e o SO₂, respectivamente, para o MP₁₀, a queda apresentada foi bem menor do que a encontrada nas fases anteriores, possuindo somente 6% de queda, aproximadamente. Já para a troca da fase L5 para a L6, observamos uma queda de 62% para o CO, 16% para o MP₁₀ e 41% para o SO₂. A maior queda para o CO foi calculada entre as fases L4 e L5, de L3 para L4 a maior queda foi do MP₁₀ e o SO₂ obteve seu melhor percentual entre as fases L5 para a L6, quando foi sancionada a Resolução CONAMA 415/09, onde o foco era a redução de enxofre nos combustíveis, discutido anteriormente. Os limites estabelecidos pelo PROCONVE para o CO entre as fases L3 e L4 caíram 83%, entre as fases L4 e L5 os limites não foram alterados e entre as fases L5 e L6 a diminuição foi de aproximadamente 35%. Para o MP₁₀ os limites padrões se mantiveram os mesmos, só ocorrendo mudança entre as fases L5 e L6, decaindo cerca de 50% nos limites máximos permitidos.

Tabela 3: Comparativo das médias de CO, MP₁₀ e SO₂ durante as fases do PROCONVE para veículos leves na RMSP.

Fases do PROCONVE	Anos	Médias de concentração		
		CO (ppm)	MP ₁₀ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
L3	1997 – 2004	12,9	48,8	16,4
L4	2005 – 2008	4,7	38,2	13,5
L5	2009 – 2013	1,6	35,8	9,9
L6	2014 – 2021	0,6	30,1	5,9

Complementando a análise, as **Tabela 4** e **5** contém a comparação das médias de concentrações encontradas na estação de Cerqueira Cesar para o CO e o MP₁₀ e na estação de Pinheiros para o SO₂. A estação de Cerqueira César foi escolhida devido ao entorno de sua localização ser marcado pela circulação de veículos leves. Primeiramente é observada a queda das concentrações entre todas as fases implementadas. Entre a fase L3 e L4 o CO apresentou queda de 29% e o MP₁₀ de 19%, em ambas as fases os poluentes analisados se mantiveram abaixo do limite estipulado pelas Resoluções. Entre as fases L4 e L5 a queda foi de aproximadamente 17% e 20% para o CO e MP₁₀, respectivamente. Em média, 42% e 12% foram os percentuais de diminuição encontrados para o CO e MP₁₀ ao decorrer da fase L5 para a L6. Entre a fase L3 e L6 os percentuais demonstram valores ainda melhores em

relação as diminuições, 65% para o CO e 43% para o MP₁₀. Quando comparada a estação de Cerqueira César com toda a RMSP, observamos uma maior nitidez nas reduções quando visto a região por completo para os dados de CO, uma vez que os percentuais de queda encontradas de forma geral são mais elevados. Já a representação do MP₁₀ na estação em questão acontece de forma mais clara, principalmente quando visto a diminuição presente entre as fases L4 e L5.

Para analisar a eficácia entre as fases impostas para veículos pesados nas concentrações de SO₂, a estação de Pinheiros foi a escolhida, por localizar-se próxima a uma das principais vias da RMSP, a Marginal Tietê, onde o tráfego de caminhões é intenso. Entre as fases L3 e L4, a queda percentual do poluente foi de 28% aproximadamente, já entre L4 e L5 apresentou diminuição de 13% e por fim, da fase L5 para a L6 40%. Da primeira fase analisada para a última, o percentual de queda é ainda maior, aproximadamente 63%. De forma geral, comparando com toda a RMSP, a estação promove uma melhor representação das diminuições do poluente nas entre as fases L4 e L5, porém, como os percentuais de queda são bem similares entre a estação e os valores gerais da RMSP, a estação se torna uma boa indicadora para a medição de SO₂. Brender et al. (2020), destacou em seu estudo o mesmo resultado encontrado neste, demonstrando que as concentrações de SO₂ não ultrapassaram o limite máximo permitido pela legislação ambiental durante os períodos analisados, ficando bem abaixo do estipulado, para esta mesma estação de monitoramento.

Tabela 4: Comparativo das médias de CO e MP₁₀ durante as fases do PROCONVE para veículos leves na estação de Cerqueira César.

Fases do PROCONVE	Anos	Médias de concentração	
		CO (ppm)	MP ₁₀ (µg/m ³)
L3	1997 – 2004	1,62	45,92
L4	2005 – 2008	1,15	37,25
L5	2009 – 2013	0,96	29,76
L6	2014 – 2021	0,56	26,08

Tabela 5: Comparativo das médias de SO₂ durante as fases do PROCONVE para veículos leves na estação de Pinheiros

Fases do PROCONVE	Anos	Médias de concentração SO ₂ (µg/m ³)
L3	1997 – 2004	1,72
L4	2005 – 2008	1,24
L5	2009 – 2013	1,07
L6	2014 – 2021	0,64

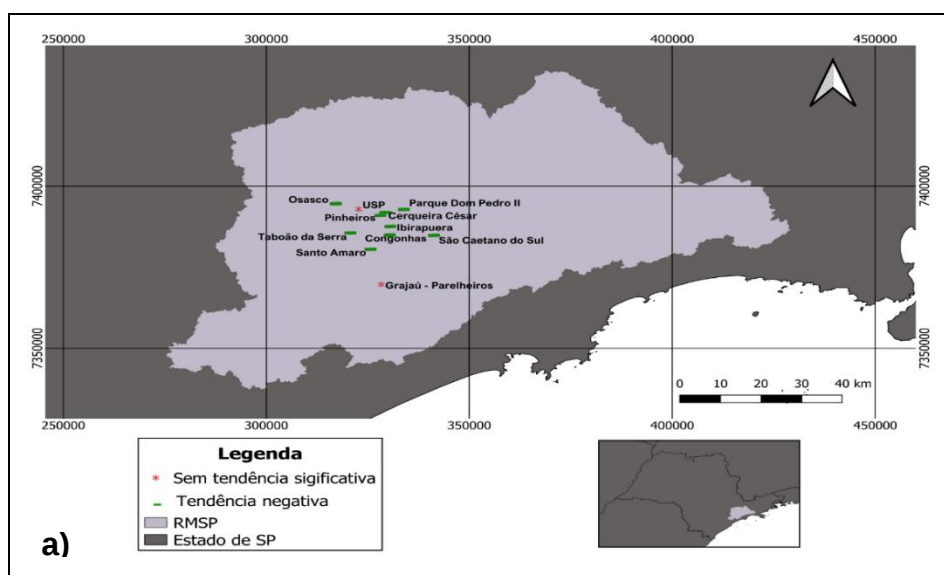
3.3. Distribuição espacial das tendências da qualidade do ar

A **Figura 8** apresenta a variação espacial das tendências obtido a partir da aplicação do método de Mann-Kendall para cada poluente considerando os dados de concentração. A tendência negativa, positiva ou sem significância estatística foi calculada a partir das médias anuais de cada estação, no período de 1987 – 2021.

Para o CO (**Figura 8a**), das 11 estações consideradas, 9 apresentaram tendências negativas para concentração do poluente e 2 não apresentaram tendência significativa estatisticamente, ou seja, 81% das estações estudadas apresentaram valores em queda corroborando as análises anteriores e destacando o impacto das políticas de controle em toda a região.

Para o MP₁₀ (**Figura 8b**), os resultados encontrados foram bem semelhantes, uma vez que 80% das estações estudadas apresentaram tendência negativa significativa e 20% destas não apresentaram tendência estatística significativa. Leirião (2018) também observou diminuição nas concentrações do MP₁₀, para as mesmas estações de monitoramento, com 58% de redução, baixando em média de 70 µg/m³ para 29 µg/m³.

A análise para o SO₂ (**Figura 8c**), também revelou uma tendência negativa em 100% das estações consideradas. Os resultados obtidos demonstram com clareza que em toda a região houve uma redução nas concentrações de poluentes.



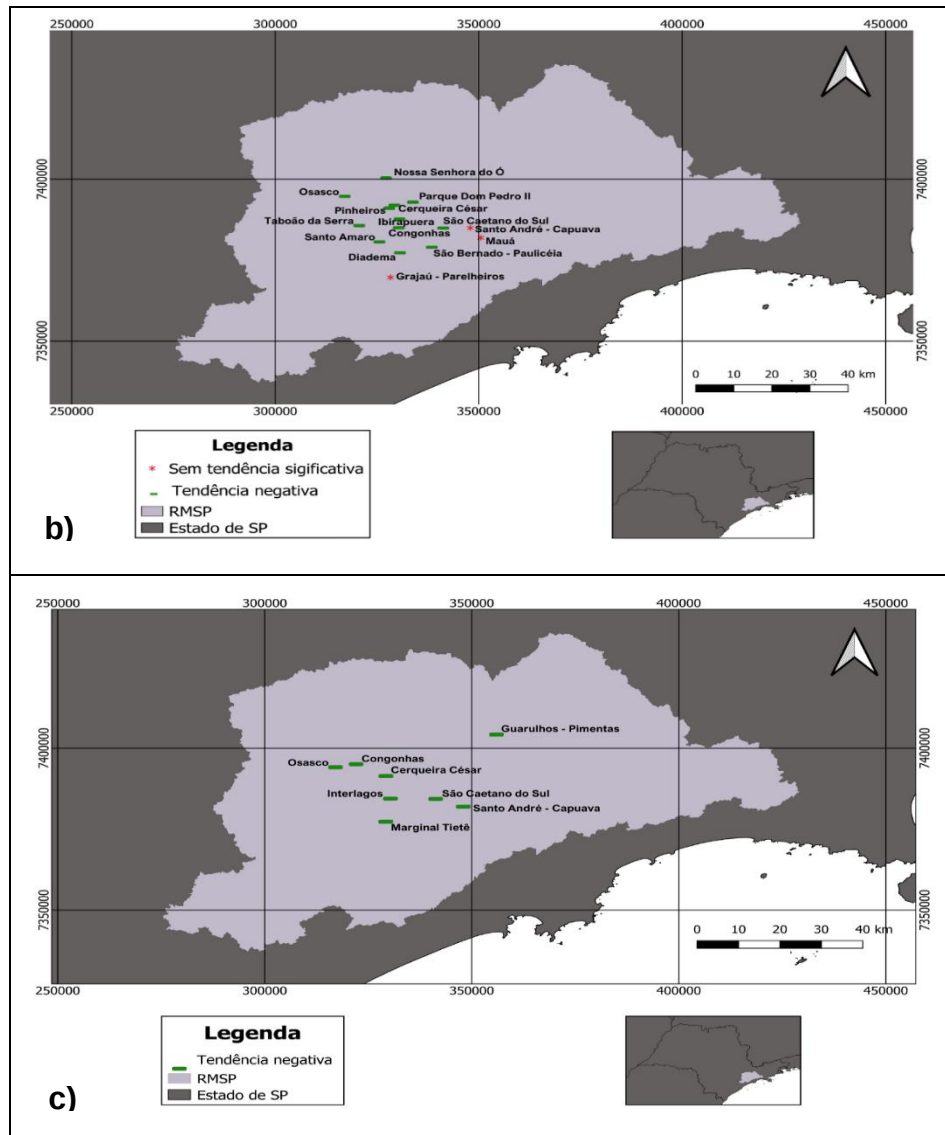


Figura 8: Distribuição espacial da tendência em diferentes estações para os poluentes (a) CO, (b) MP₁₀ e (c) SO₂, respectivamente, entre os anos de 1998 e 2021.

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo avaliar as tendências das emissões e concentrações dos poluentes entre os anos de 1987 a 2021 na RMSP e a relação com a implementação de políticas públicas para o controle de poluição do ar, a análise comprovou a tendência de diminuição de emissão dos poluentes e das concentrações de CO, MP₁₀ e SO₂ observadas nas estações de monitoramento em toda a Região Metropolitana de São Paulo.

Diante de todas as análises realizadas, pode-se comprovar a eficácia do PROCONVE e dos limites impostos pelas Resoluções da CONAMA, onde ambas impactaram diretamente nos valores de emissões e concentrações principalmente do CO e do MP₁₀, mesmo com o volume crescente da população e de maior frota circulante, o comportamento de queda é constantemente observado. Vale destacar que para o MP₁₀ várias ultrapassagens dos padrões impostos pelas Resoluções CONAMA foram registradas. As concentrações de SO₂ foram impactadas diretamente pela a implementação de novos combustíveis, onde a diminuição do teor de enxofre passou a ser exigência. Quando aplicado o Teste de Mann-Kendall, obtive-se análises estatísticas significativas, encontrando tendência temporal de queda para todos os poluentes analisados.

5. REFERÊNCIAS

- ALVIN et al. 2023. **COVID-19 Pandemic: Impacts on Air Quality during Partial Lockdown in the Metropolitan Area of São Paulo**. Remote Sensing. V.15, p. 1262.
- ANDRADE et al. 2017. **Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives**. Atmospheric Environment, v. 159, p. 66-82.
- ARBEX, M.A. et al. 2012. **Air pollution and the respiratory system**. Núcleo de Estudos em Epidemiologia Ambiental, Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental, Departamento de Patologia, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP) Brasil.
- BATISTA, R.J.R. 2012. **Climatologia e previsão climatológica, via modelo RgCM3, de índices de conforto térmico para a Região Metropolitana de São Paulo**. Tese de Mestrado.
- BRENDER et al. 2020. **Development o fair quality monitoring and challenges to meet standards of the World Health Organization (WHO)**. TEC-USU, v.3, n.1, p.128 – 146.
- CARVALHO et al. 2012. **Avaliação da influência de condições meteorológicas na ocorrência e manutenção de um episódio prolongado com altas concentrações de ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.27, n.4, p.463 – 474.
- CARVALHO et al. 2013. **A nova gasolina S50 e o PROCONVE L6**. Blucher Engineering Proceedings. V.1, n.1, p.184-193.
- CARVALHO et al. 2015. **Air quality status and trends over the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil as a result of emission control policies**. Environmental Science & Policy 47, 68-79.

CAVALCANTI, P.M.P.S. 2010. **Modelo de gestão da qualidade do ar – Abordagem preventiva e corretiva**. Tese de Doutorado.

CETESB. 1989. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 1989**. São Paulo.

CETESB. 1993. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 1993**. São Paulo.

CETESB. 1994. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 1994**. São Paulo.

CETESB. 2019. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2019**. São Paulo.

CETESB. 2020. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2020**. São Paulo.

CETESB. 2022. **Histórico**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/>. Acesso em: 29 de abr. 2023.

CETESB. 2023. **Padrões de Qualidade do ar**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/#:~:text=O%20DE%20n%C2%BA%2059113%2F2013,desfavor%C3%A1veis%20%C3%A0%20dispers%C3%A3o%20dos%20poluentes>. Acesso em: 29 de junho de 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução CONAMA nº18, de 6 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 8792 – 8795, 17 de junho de 1986.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução CONAMA nº 492, de 20 de dezembro de 2018. Altera a Resolução nº15/1995 e dá outras providências. **Diário Oficial da União**.

DIAS, C., BALES, M.P., SILVA, S.R. 2021. **Benefits of new PROCONVE phases for light duty vehicles, considering Vehicle refueling emissions in the São Paulo Metropolitan Area**. AEA – Brazilian Society of Automotive Engineering – SIMEA 2021.

ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decreto Estadual nº 59.113, de 23 de abril de 2013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. **Governo do Estado de São Paulo**.

GOUVEIA et al. 2003. **Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras**. Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília, v.12, n.1, p.29 - 40.

IBAMA. 2016. **Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE)**. Disponível em: < <http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>>. Acesso em: 25 de abr. 2023.

JATOBÁ, B.R.G. 2020. **Variabilidade da coluna total de gases (SO₂, NO₂, CH₄ e CO) sobre regiões metropolitanas Sul-Americanas**. Tese de Pós-Graduação.

KUMAR et al. 2016. **New directions: From biofuels to wood stoves: The modern and ancient air quality challenges in the megacity of São Paulo**. Atmospheric Environment, v. 140, p. 364-369.

KENDALL, M.G. 1975. **Rank Correlation Methods**. Charles Griffin, London.

KUMARI, P. TOSHNIWAL, D. **Impact of lockdown on air quality over major cities across the globe during COVID-19 pandemic**. Urban Climate. V.34.

LEIRIÃO, L.F.L, 2018. **Avaliação do impacto do programa de controle da poluição do ar por veículos automotores e da frota em desacordo com o programa na saúde pública da Região metropolitana de São Paulo.** Tese de Pós-Graduação.

MANN, H.B. 1945. **Nonparametric tests against trend.** *Econometrica* v.13, p. 245 - 259.

MORIZONO et al. 2018. **Análise da preferência de consumidores por etanol e gasolina no Brasil.** *Ensaio FEE*, v.38, n.4, p. 877-902.

MOTTA et al. 2021. **Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil.** *Estudos avançados*, v.35, p.102.

MOTTA, S.R. MENDES, A.P. 1995. **Estimativas de custos de saúde associados à poluição hídrica no Brasil.** *Contabilidade ambiental: Teoria, metodologia e estudos de caso no Brasil*, IPEA, Rio de Janeiro, p. 81-92.

PELÁEZ et al. 2020. **Air quality status and trends over large cities in South America.** *Environmental Science & Policy*. V.114, p. 422-435.

PÉREZ-MARTÍNEZ, P.J., ANDADRE, M.F., MIRANDA, R.M. 2015. **Traffic-related air quality trends in São Paulo, Brazil.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v.120, p.6290 – 6304.

REBOITA et al. 2012. **Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul.** *Terræ didática*, v.8, n.1, p.34 – 50.

RISSO, M.L. 2018. **Desenvolvimento da indústria de veículos elétricos no Brasil: O papel das políticas públicas.** Dissertação de Mestrado.

SEINFELD, J.H. PANDIS, S.N. 1998. **Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change.** Toronto: Wiley-Interscience.

SILVA, G.F.P. 2022. **Análise das concentrações de poluentes atmosféricos sobre a Região Metropolitana de São Paulo durante o período da Quarentena.** Tese de conclusão de curso.

SILVA, J.C.R. 2020. **Poluição atmosférica na cidade de São Paulo: interferência do isolamento social devido a pandemia da COVID-19.** Tese de conclusão de curso.

SLOVIC, A.D. RIBEIRO, H. 2018. **Policy instruments surrounding urban air quality: The cases of São Paulo, New York City and Paris.** Environmental Science & Policy, v. 81, p. 1-9.

SOUZA et al. 2017. **Avaliação sobre as emissões veiculares com base no Plano de Controle de Poluição Veicular da Cidade de São Paulo nos anos de 1983-2015.** VI SINGEP.

STOLFL, R. OLIVEIRA, A.P.R. 2020. **The success of the brazilian alcohol program (proálcool) - a decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 40, n. 2, p. 243-248.

SZWARCFITER, L. 2004. **Opções para o aprimoramento do controle de emissões de poluentes atmosféricos por veículos leves no Brasil: uma avaliação do potencial de programas de inspeção e manutenção e de renovação acelerada da frota.** Tese de Pós-Graduação.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2021. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** World Health Organization. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>>. Acesso em: 03 de abr. 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2022. **Air pollution data portal.** Disponível em: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution>. Acesso em: 03 de abr. 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2022. **Novos dados da OMS revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre.** Disponível em:

<https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre>. Acesso em: 05 de abr. 2023.