



UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental



Gabriella Fernandes Prazeres Silva

***ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS SOBRE
A REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO DURANTE O PERÍODO DA
QUARENTENA***

Ouro Preto

Junho/2022

***ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
SOBRE A REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO DURANTE O PERÍODO
DA QUARENTENA***

Gabriella Fernandes Prazeres Silva

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para
obtenção do Grau de Engenharia
Ambiental na Universidade Federal de
Ouro Preto.

Orientadora: Prof. Dra. Lívia Cristina Pinto Dias – UFOP

Co-orientadora: Prof. Dra. Débora Souza Alvim - INPE

Ouro Preto

Junho/2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Gabriella Fernandes Prazeres.
Análise das concentrações de poluentes atmosféricos sobre a região metropolitana de São Paulo durante o período da quarentena.
[manuscrito] / Gabriella Fernandes Prazeres Silva. - 2022.
52 f.: il.: color., gráf., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Lívia Cristina Pinto Dias.

Coorientadora: Dra. Débora Souza Alvim.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. São Paulo (SP). 2. Endemia - COVID-19. 3. Poluição Atmosférica. I. Dias, Lívia Cristina Pinto. II. Alvim, Débora Souza. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 502:504

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriella Fernandes Prazeres Silva

ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS SOBRE A REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO DURANTE O PERÍODO DA QUARENTENA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental

Aprovada em 24 de junho de 2022

Membros da banca

Dra. Livia Cristina Pinto Dias - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Débora Souza Alvim - Coorientadora - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Dra. Patrícia Porta Nova da Cruz
Dr. Christiano Ottoni Carvalho - Universidade Federal de Ouro Preto

Eu, Livia Cristina Pinto Dias, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/12/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Livia Cristina Pinto Dias, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2022, às 13:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0447295** e o código CRC **5C64C0E5**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pela oportunidade de ensino gratuito e de qualidade. Aos meus pais Vamberto e Lúcia por sempre estarem comigo na torcida pelo meu sucesso. Ao Gabriel pelo amor e carinho. A minha orientadora Dra. Livia Cristina Pinto Dias e coorientadora Dra. Débora Souza Alvim pelos ensinamentos. Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o CNPq pelo fomento à pesquisa.

RESUMO

A poluição do ar tornou-se um dos fatores que mais afetam a qualidade de vida da população, ocasionando prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente. Emissões de gases por veículos automotores comprometem significativamente a qualidade do ar em cidades populosas, como na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), por liberarem grande quantidade de material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COV), sendo estes três últimos gases poluentes que formarão ozônio (O₃) na troposfera. O objetivo deste estudo foi avaliar os impactos na qualidade do ar na RMSP durante o bloqueio parcial implementado para proporcionar o distanciamento social devido à pandemia da COVID-19. Foram analisados os dados meteorológicos e de concentração dos poluentes das estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB para RMSP. Foram comparados com o ciclo diurno de três anos anteriores referentes às médias dos meses de abril e maio (2017, 2018 e 2019) e o mesmo período do ano de 2020, quando ocorreu o bloqueio parcial devido à pandemia de COVID-19. Reduções drásticas nas concentrações médias horárias de CO (43,3%), NO (85%), NO₂ (43,7%), MP2.5 (11%) foram observadas em 2020 na RMSP nas estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB durante o bloqueio parcial em comparação com a média horária dos três anos anteriores sem pandemia. Em contraste, um aumento de aproximadamente 26,4% nas concentrações de O₃ foi observado em áreas urbanas altamente influenciadas pelo tráfego de veículos, provavelmente relacionado à diminuição dos óxidos de nitrogênio (NO_x). Também foram analisados os dados obtidos por sensoriamento remoto para a região Sudeste brasileira para a concentração de dióxido de nitrogênio (NO₂) do sensor *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) localizado no satélite AURA e dados de CO, SO₂ e BC a partir da análise do satélite MERRA-2 sobre a região do sudeste do Brasil e de seis estações de qualidade do ar na RMSP, para avaliar as variações da concentração de poluentes atmosféricos durante o bloqueio parcial. Os dados mensais do OMI e do MERRA-2 do período de abril e maio de 2020 foram comparados com a média do mesmo período para os anos de 2017 a 2019. Ocorreu diminuição de 10% até mais de 60% da concentração de NO₂ sobre a RMSP e

RMRJ, já na Região Metropolitana de Belo Horizonte e Vitória (RMBH) e (RMV) houve uma diminuição em torno de 10%. Nas concentrações de CO e BC proveniente do MERRA-2 observa-se uma diminuição maior em torno de 10% durante o período do bloqueio parcial devido o COVID-19 sobre quase todo estado de São Paulo, principalmente na divisa do estado de São Paulo com o Rio de Janeiro. A concentração de SO₂ proveniente do MERRA-2 de 5 a 10% menor sobre a RMSP e RMRJ e sobre o oeste da RMBH, diminuição de 30 a 50% na divisa do estado de São Paulo com estado do Rio de Janeiro, já na região de RMV observa-se aumento do poluente, pois no período deste estudo esta região ainda não estava altamente impactada pela pandemia do COVID-19.

Palavras-chaves: Poluição Atmosférica; São Paulo; Pandemia COVID-19.

ABSTRACT

Air pollution has become one of the factors that most affect the quality of life of the population, causing damage to human health and the environment. Gas emissions by motor vehicles significantly compromise air quality in populous cities, such as in the Metropolitan Region of São Paulo (RMSP), by releasing large amounts of particulate matter (PM), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x) and volatile organic compounds (VOC), the latter three pollutant gases that will form ozone (O₃) in the troposphere. The aim of this study was to assess the impacts on air quality in the RMSP during the partial lockdown implemented to provide social distancing due to the COVID-19 pandemic. Meteorological and pollutant concentration data from CETESB air quality monitoring stations for RMSP were analyzed. They were compared with the diurnal cycle of the previous three years referring to the averages of the months of April and May (2017, 2018 and 2019) and the same period of the year 2020, when the partial blockade occurred due to the COVID-19 pandemic. Drastic reductions in hourly average concentrations of CO (43.3%), NO (85%), NO₂ (43.7%), PM_{2.5} (11%) were observed in 2020 in the RMSP at air quality monitoring stations from CETESB during the partial lockdown compared to the hourly average of the previous three years without a pandemic. In contrast, an increase of approximately 26.4% in O₃ concentrations was observed in urban areas highly influenced by vehicle traffic, probably related to the decrease in nitrogen oxides (NO_x). Data obtained by remote sensing were also analyzed. For the Southeast region of Brazil for the concentration of nitrogen dioxide (NO₂) from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) sensor located on the AURA satellite and CO, SO₂ and BC data from the MERRA-2 satellite analysis over the Southeast region of Brazil. Brazil and six air quality stations in the RMSP, to evaluate the variations in the concentration of atmospheric pollutants during the partial blockade. Monthly OMI and MERRA-2 data for the April and May 2020 period were compared with the average for the same period for the years 2017 to 2019. There was a decrease from 10% to more than 60% of the NO₂ concentration on the RMSP and RMRJ, in the Metropolitan Region of Belo Horizonte and Vitória (RMBH) and (RMV) there was a decrease of around 10%. In the concentrations of CO and BC from MERRA-2, a

greater decrease of around 10% was observed during the period of the partial blockade due to COVID-19 over almost the entire state of São Paulo, mainly on the border of the state of São Paulo with the Rio de Janeiro. The concentration of SO₂ from MERRA-2 from 5 to 10% lower on the RMSP and RMRJ and on the west of the RMBH, decrease from 30 to 50% on the border of the state of São Paulo with the state of Rio de Janeiro, already in the region of RMV, an increase in the pollutant is observed, since during the period of this study this region was not yet highly impacted by the COVID-19 pandemic

Keywords: Atmospheric pollution; Sao Paulo; COVID-19 pandemic.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Mapa de localização da região Sudeste brasileira, com destaque para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) ----- | 17 |
| Figura 2: Mapa de localização das estações meteorológicas da CETESB, da RMSP ----- | 29 |
| Figura 3: Concentração de CO (ppm) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia COVID-19 (2017-2019) e com pandemia (2020) ----- | 32 |
| Figura 4: Concentração de NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia COVID-19 (2017-2019) e com pandemia (2020) ----- | 35 |
| Figura 5: Concentração de NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia COVID-19 (2017-2019) e com pandemia (2020) ----- | 36 |
| Figura 6: Concentração de O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia COVID-19 (2017-2019) e com pandemia (2020) ----- | 39 |
| Figura 7: Concentração de MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia COVID-19 (2017-2019) e com pandemia (2020) ----- | 41 |
| Figura 8: Concentração superficial de NO ₂ para o período de abril e maio com pandemia (2020) e sem pandemia COVID-19 (2017-2019) provenientes do sensor OMI ----- | 43 |
| Figura 9: Concentração superficial de CO para o período de abril e maio com pandemia (2020) e sem pandemia COVID-19 (2017-2019) provenientes do MERRA-2----- | 44 |
| Figura 10: Concentração superficial de SO ₂ para o período de abril e maio com pandemia (2020) e sem pandemia COVID-19 (2017-2019) provenientes do MERRA-2 ----- | 45 |
| Figura 11: Concentração superficial de BC para o período de abril e maio com pandemia (2020) e sem pandemia COVID-19 (2017-2019) provenientes do MERRA-2 ----- | 46 |

LISTA DE SIGLAS

BC – BLACK CARBON

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

CO – MONÓXIDO DE CARBONO

CO₂ – DIÓXIDO DE CARBONO

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE

CONTRAN – CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO

COV – CARBONO ORGÂNICO VOLÁTIL

GBD – GLOBAL BURDEN OF DISEASE

GCM – MODELO DE CIRCULAÇÃO GERAL

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS
RENOVÁVEIS

IQA – ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR

LAT – LATITUDE

LON - LONGITUDE

MP - MATERIAL PARTICULADO

MP10 – MATERIAL PARTICULADO INALÁVEL

MP2.5 – MATERIAL PARTICULADO RESPIRÁVEL

NCAR – CENTRO NACIONAL DE PESQUISAS ATMOSFÉRICAS

NCL – LINGUAGEM DE NCAR

NO – MONÓXIDO DE NITROGÊNIO

NO₂ – DIÓXIDO DE NITROGÊNIO

O₃ – OZÔNIO

OMI – OZONE MONITORING INSTRUMENT

OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE

PROCONVE – PROGRAMA DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR POR VEÍCULOS
AUTOMOTORES

PRONAR – PROGRAMA NACIONAL DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

QUALAR – SISTEMA DE INFORMAÇÕES DA QUALIDADE DO AR

RMBH – REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

RMRJ – REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

RMSP –REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

RMV – REGIÃO METROPOLITANA DE VITÓRIA

SINIMA – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O MEIO AMBIENTE

SISNAMA – SISTEMA NACIONAL DE MEIO AMBIENTE

SO₂ – DIÓXIDO DE ENXOFRE

UT – UNIVERSIDADE DE TORONTO

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 16 |
| 2.1. Objetivo Geral | 16 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 16 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 3.1. Local de Estudo | 17 |
| 3.2. Legislações Brasileiras sobre a Poluição Atmosférica | 18 |
| 3.3. Controle da Emissão de Poluentes do ar por Fontes Fixas | 21 |
| 3.4. Controle da Emissão de Poluentes do Ar por Fontes Móveis | 22 |
| 3.5. Relação COVID-19 e Poluição do Ar | 27 |
| 3.6. Sensoriamento remoto na qualidade do ar | 27 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 29 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 31 |
| 5.1. Parâmetros meteorológicos e poluentes da RMSP | 31 |
| 5.2. Parâmetros meteorológicos e poluentes do Sudeste | 42 |
| 6. CONCLUSÃO | 46 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 47 |

1. INTRODUÇÃO

Em 11 de março de 2020, a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou que a COVID-19, doença causada pelo novo Coronavírus SARS-CoV-2, havia se caracterizado como uma pandemia (WHO, 2020). No Brasil, o primeiro caso foi confirmado em 26 de fevereiro de 2020, em São Paulo - SP. Até o momento (31 de maio de 2022), existem 31.019.038 casos confirmados em todas as regiões do Brasil, a maioria dos casos (5.511.939) confirmados no estado de São Paulo (BRASIL, 2020), sendo São Paulo - SP, a cidade com mais casos confirmados (1.064.998) (SEADE, 2022).

O Brasil declarou a COVID-19 uma emergência de saúde pública em 3 de fevereiro (CRODA et al., 2020) e São Paulo e Rio de Janeiro foram os primeiros estados a intensificar as restrições de atividades para estimular o isolamento social. Em 24 de março de 2020, foi ordenado o bloqueio parcial pelo governo do estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2020), com o fechamento de shoppings, restaurantes, academias, escolas de ensino fundamental, médio e universidades. Supermercados e drogarias passaram a funcionar com restrições quanto à distância pessoa a pessoa, e o transporte público passou a funcionar com jornada reduzida, além da adoção de trabalho no formato *home office*, quando possível. Assim, a interrupção de diversas atividades poluidoras tem o potencial de mitigar os efeitos da poluição do ar na saúde da população.

Devido à pandemia de COVID-19, o número de automóveis circulando nas grandes cidades caiu consideravelmente, devido à situação de *lockdown* na qual a população se encontrava. Com as indústrias também em escala reduzida de produção e, conseqüentemente, menores emissões de monóxido de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), carbono orgânico volátil (COV) e dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, há grande potencial de diminuição da poluição atmosférica.

Por exemplo, o setor de transportes é uma importante fonte de emissão de poluentes do ar e gases de efeito estufa na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A frota da RMSP representa cerca de 7 milhões de veículos. Na RMSP as

fontes móveis e fixas foram responsáveis pela emissão para a atmosfera de aproximadamente 120 mil t/ano de monóxido de carbono, 35 mil t/ano de Compostos Orgânicos Voláteis, 70 mil t/ano de óxidos de nitrogênio, 5 mil t/ano de material particulado e 7 mil t/ano de óxidos de enxofre. Desses totais, os veículos são responsáveis por 97% das emissões de CO, 74% de COV, 62% de NO_x, 16% de SO_x e 40% de MP, de acordo com relatório da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (CETESB, 2020).

Tratando-se de saúde pública, a redução da poluição do ar está diretamente relacionada a uma queda no número de pessoas com problemas respiratórios, o que é benéfico para os hospitais e postos de saúde que, estando focados no atendimento da COVID-19, lidam com menos pessoas com quadro respiratório comprometido, com doenças como asma, bronquites, alergias ou ainda cardiorrespiratórias.

Os danos à saúde e a ausência de barreiras para os contaminantes no ar justificam a preocupação em identificar esses poluentes na atmosfera. A poluição emitida por um determinado país ou localidade não se restringe a esses locais podendo causar danos além de suas fronteiras. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), 92% da população mundial vive em locais onde os níveis de qualidade do ar ultrapassam os limites estabelecidos pela organização e quatro milhões de mortes por ano estão associadas à exposição à poluição do ar em ambientes externos, com 90% deles ocorrendo em países de baixa e média renda. O Estudo da *Global Burden of Disease 2015* (GBD, 2015) mostra que a poluição do ar estava diretamente ligada a 19% das mortes por doenças cardiovasculares em todo o mundo, 24% por doenças isquêmicas do coração, 23% por câncer de pulmão e 21% por acidentes vasculares cerebrais (WANG *et al.*, 2016).

Um estudo feito pela Universidade de Toronto (UT) alega que houve a diminuição de 40% da poluição atmosférica em cidades que decretaram estado emergencial no mês de fevereiro: Wuhan, Hong Kong, Kyoto, Milão, Seul e Xangai. Este estudo realizado pelo professor Marc Cadotte da UT, analisou o índice de qualidade do ar (IQA) para as seis cidades afetadas pelo COVID-19 que implementaram medidas de emergência em fevereiro de 2020 (CADOTTE, 2020).

Os autores então compararam o IQA de 2020 nessas cidades a de fevereiro de 2019, descobrindo que todas as seis mostraram uma redução significativa nas concentrações de poluição do ar neste ano. Entretanto, considerando a concentração de O₃ para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), houve aumento de 30%, provavelmente devido à diminuição da concentração de 77,3% de NO, de acordo com estudo feito em São Paulo por Nakada e Urban (2020).

Para comparação com outros eventos que ocorreram no país, é possível recorrer ao período da greve dos caminhoneiros, que ocorreu no período de 21 a 31 de maio de 2018. De acordo com Alvim *et al.* (2020), durante este período, houve 31% de diminuição de CO em relação ao mesmo período em 2015 a 2017. Enquanto o NO e o NO₂ diminuíram 38% e 31%, respectivamente, o O₃ teve aumento de 65%. Este aumento do ozônio é atribuído à queda dos níveis de NO, que reage com o O₃ para formar NO₂ e O₂, é a principal rota de consumo de O₃ troposférico.

O estudo de Chiquetto *et al.* (2020) sobre a greve dos caminhoneiros, utilizando 7 estações na RMSP e um período de quatro anos, encontrou redução de 50% nas médias de CO e NO e aumento de 40% do O₃, enquanto os resultados para NO₂ e material particulado foram mistos, indicando a importância de outras fontes além das veiculares, das reações secundárias e do transporte de poluentes de outras regiões próximas.

Pesquisas recentes relatam melhorias na qualidade do ar associadas a medidas de distanciamento social e consequente diminuição do trânsito de veículos. Por exemplo, Zambrano-Monserrate *et al.* (2020) utilizaram o Serviço de Monitoramento da Atmosfera Copernicus para analisar dados de material particulado fino (MP_{2.5}) na China e observaram uma redução de aproximadamente 20 a 30% em fevereiro de 2020 (média do mês) em comparação com as médias mensais de fevereiro de 2017, 2018 e 2019.

Tobías *et al.* (2020) utilizaram o Instrumento de Monitoramento Troposférico Copernicus e dados de uma estação de tráfego em Barcelona (Espanha), fornecidos pela organização local para monitoramento da poluição atmosférica, para avaliar as mudanças na qualidade do ar durante o *lockdown* na cidade de Barcelona. Os

autores observaram redução de 31% e 51% do material particulado grosso (MP₁₀) e do NO₂, respectivamente, durante o bloqueio em relação ao mês anterior ao bloqueio. Sharma *et. al.* (2020) também analisaram dados locais de diferentes regiões da Índia, para avaliar os efeitos do bloqueio na qualidade do ar. Os autores observaram redução de 43% e 31% do MP_{2.5} e do MP₁₀, respectivamente, durante o bloqueio em comparação ao mesmo período dos últimos quatro anos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo desse estudo foi avaliar os impactos na qualidade do ar durante o bloqueio parcial, implementado para proporcionar o distanciamento social devido à pandemia da COVID-19, da Região Metropolitana de São Paulo, e posteriormente fazer uma relação com o Sudeste Brasileiro.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar dados meteorológicos para o mesmo período, com a intenção de verificar o papel das condições meteorológicas na concentração dos poluentes dentro do contexto da pandemia, na RMSP.
- Analisar os poluentes CO, NO, NO₂, O₃ e MP_{2.5} a partir do período do *lockdown* na RMSP, em abril e maio de 2020, comparando com a média do mesmo período com os três anos anteriores, quando não houve a pandemia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Local de Estudo

A região sudeste do Brasil é composta pelos estados de São Paulo (SP), Minas Gerais (MG), Espírito Santo (ES) e Rio de Janeiro (RJ), sendo suas capitais São Paulo, Belo Horizonte, Vitória e Rio de Janeiro, respectivamente Figura 1.

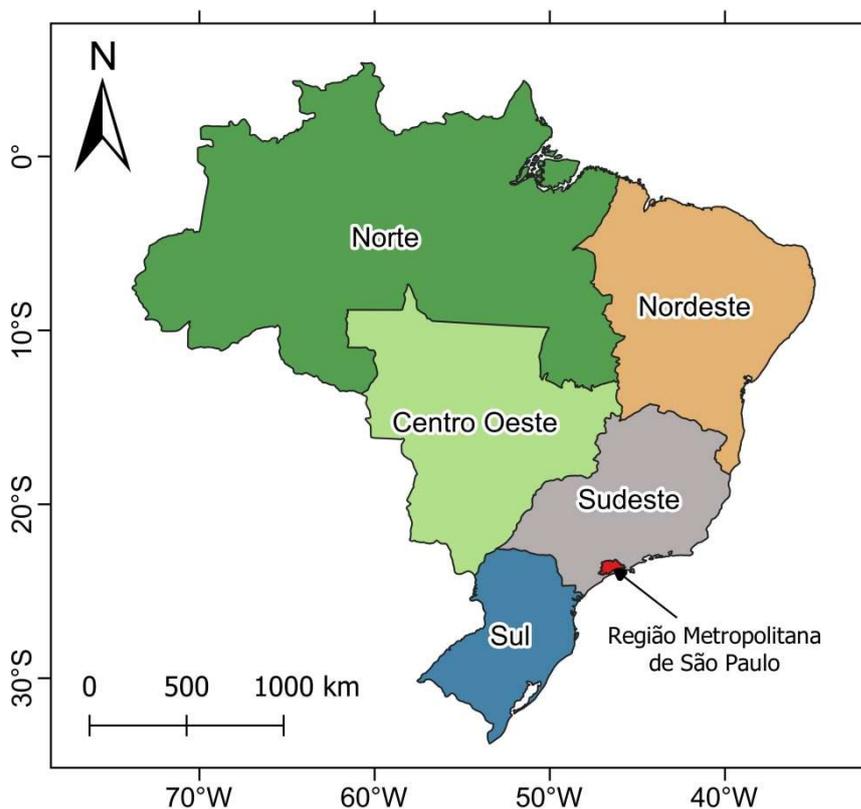


Figura 1 – Região Sudeste do Brasil, com destaque para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)

Dentre elas, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP – Figura 1) é a maior região metropolitana do Brasil, com cerca de 21,5 milhões de habitantes, e uma das dez regiões metropolitanas mais populosas do mundo. Reúne 39 municípios do estado de São Paulo em intenso processo de conurbação. Sua população é superior à de vários países do mundo, como o Chile (17.248.450), Países Baixos (17.100.475) e Portugal (10.487. 289) (IBGE, 2022).

Este número populacional influencia na quantidade de veículos automotores por pessoa, sendo apenas na cidade de São Paulo 31.455.473 cadastrados no ano de 2021, sendo 19.305.526 automóveis e 168.738 ônibus (IBGE,2022).

3.2. Legislações Brasileiras sobre a Poluição Atmosférica

A legislação federal brasileira que regulamenta a qualidade do meio ambiente, relacionando-a com a poluição do ar, das águas e do solo, teve início com o Decreto Lei nº 1.413, de 14 de agosto de 1975, que *dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais*. O Decreto-Lei nº 1.413/1975 foi complementado pela Lei nº 6.803, de 02 de julho de 1980, que *dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial nas áreas críticas de poluição e dá outras providências*. Tanto o Decreto-Lei nº 1.413/1975, como a Lei nº 6.803/1980, foram concebidos em decorrência dos graves problemas de poluição do ar em regiões densamente industrializadas, entre as quais Cubatão, em São Paulo. Eles estabelecem regras para a localização de áreas industriais e as limitações de uso em seus entornos e não tratam especificamente de limites de emissão (PEREIRA JUNIOR, 2007).

Em face dos empecilhos que a legislação precedente não abrangia, procurou o legislador da década de 1980 abrir novos caminhos a uma tutela mais adequada do meio ambiente. Promulgou-se, então, a Lei no 6.938/81, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente (art. 1º), com visível influência da norma norte-americana *National Environmental Protection Act* (1969), que propugna por agências governamentais com o fim de assegurar mecanismos eficientes para a proteção ambiental, e da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo em 1972 (OFICINA DE TEXTOS, 2018).

Os instrumentos de gestão ambiental que conscientizam os princípios e objetivos da Política Nacional de Meio Ambiente constam no art. 9º. São eles:

- Os padrões de qualidade ambiental;
- O zoneamento ambiental;

- Os incentivos à produção e instalação de equipamentos e à criação ou absorção de tecnologia, voltados para a melhoria da qualidade ambiental;
- A criação de reservas e estações ecológicas, áreas de proteção ambiental e as de relevante interesse ecológico, pelos Poderes Públicos Federal, Estadual e Municipal, o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima);
- As penalidades disciplinares ou compensatórias ao não cumprimento das medidas necessárias à preservação ou correção da degradação ambiental;
- A instituição do Relatório de Qualidade do Meio Ambiente, a ser divulgado anualmente pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (Ibama);
- A garantia da prestação de informações relativas ao meio ambiente, obrigando-se o Poder Público a produzi-las quando inexistentes;
- O cadastro técnico federal de atividades potencialmente poluidoras e/ou utilizadoras dos recursos ambientais, os instrumentos econômicos (como concessão florestal, servidão ambiental, seguro ambiental e outros);
- E o licenciamento ambiental, a cargo dos entes federativos que compõem o Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama).

A Lei nº 6.938/1981 atribui ao Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA – entre outras, a competência para *estabelecer, privativamente, normas e padrões nacionais de controle da poluição por veículos automotores, aeronaves e embarcações, mediante audiência dos Ministérios competentes* (art. 8º, inciso VI) e para *estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente com vistas ao uso racional dos recursos ambientais, principalmente os hídricos*” (art. 8º, inciso VII).

Com base nas competências a ele atribuídas pela Lei nº 6.938/1981, o CONAMA vem estabelecendo, por meio de resoluções, as normas para o controle da emissão de poluentes do ar por fontes fixas e móveis.

A Constituição outorgada em 1988 incorporou o conteúdo da Lei nº 6.938/1981 e efetuou a divisão de competências legislativas e administrativas dos

entes da Federação. Estabelece, assim, como competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, “*proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas*” (art. 22, inciso VI) e que compete à União, aos Estados e ao Distrito Federal legislar concorrentemente sobre “*florestas, caça, pesca, fauna, conservação da natureza, defesa do solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e controle da poluição*” (art. 24, inciso VI) devendo, na legislação concorrente, a União limitar-se ao estabelecimento de normas gerais (PEREIRA JUNIOR, 2007).

A Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 (Lei de Crimes Ambientais), *dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências*. Na Lei nº 9.605/1998, foram consolidadas todas as infrações e sanções previstas na legislação ambiental federal. O artigo mais contundente, em termos de punir a poluição de qualquer natureza, é o 54, reproduzido a seguir. (PEREIRA JUNIOR, 2007)

Art. 54. Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora:

Pena - reclusão, de um a quatro anos, e multa.

§ 1º Se o crime é culposo: Pena - detenção, de seis meses a um ano, e multa.

§ 2º Se o crime:

II - Causar poluição atmosférica que provoque a retirada, ainda que momentânea, dos habitantes das áreas afetadas, ou que cause danos diretos à saúde da população;

V - Ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos:

Pena - reclusão, de um a cinco anos.

§ 3º Incorre nas mesmas penas previstas no parágrafo anterior quem deixar de adotar, quando assim o exigir a autoridade competente, medidas de precaução em caso de risco de dano ambiental grave ou irreversível.

Em 2018, é publicada a Resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018, que “Dispõe sobre padrões de qualidade do ar”, sendo a legislação mais recente e que dispõe sobre padrões para fontes fixas e móveis.

3.3. Controle da Emissão de Poluentes do ar por Fontes Fixas

A legislação que trata do controle da poluição do ar por fontes fixas de emissão, ou seja, por indústrias, usinas termelétricas de energia elétrica, mineradoras, etc., teve seu início, também, com o Decreto-Lei nº 1.413, de 14 de agosto de 1975, prosseguindo com o Decreto nº 76.389, de 3 de outubro de 1975, que o regulamentou, e com a Lei nº 6.803, de 2 de julho de 1980.

Embora não estabeleça diretamente os níveis máximos de emissão, esses instrumentos legais dão diretrizes para a localização de complexos industriais, de modo a que suas emissões interfiram o mínimo possível com outras atividades humanas em seu entorno, como áreas habitacionais, escolas, instituições de saúde, etc. A Lei nº 6.803/1980 trata, especificamente, da localização industrial em áreas críticas de poluição.

A fixação de parâmetros para a emissão de poluentes gasosos e materiais particulados (materiais sólidos pulverizados) por fontes fixas começou a ser efetuada por meio da Resolução do CONAMA nº 005/1989, que dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR.

Seguindo um padrão internacional, o PRONAR trata da qualidade do ar, estabelecendo padrões de qualidade de acordo com os usos das áreas consideradas. Tratando-se de um programa pioneiro no País, estabelece metas e instrumentos de ação, incluindo a elaboração de um inventário nacional de fontes de poluição do ar e de áreas críticas de poluição.

As Resoluções CONAMA nº 003/19902 e nº 008/19903 complementam o PRONAR estabelecendo limites para a concentração de determinados poluentes no

ar. Esses limites tiveram como base normas (ou recomendações) da Organização Mundial da Saúde, que levam em conta limites de concentração compatíveis com a saúde e o bem-estar humanos.

Em seu art. 1º, a Resolução CONAMA nº 003/1990 define que são padrões de qualidade ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Define como *poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: (i) impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; (ii) inconveniente ao bem-estar público; (iii) danoso aos materiais, à fauna e flora; (iv) prejudicial à segurança. ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.*

Nas Resoluções nº 003/1990 e nº 008/1990, são estabelecidas concentrações máximas para: partículas totais em suspensão (material particulado); fumaça (composta principalmente de dióxido de carbono – CO₂); partículas inaláveis; dióxido de enxofre; monóxido de carbono (CO); ozônio e dióxido de nitrogênio.

Em 2006, por meio da Resolução nº 382, o CONAMA atualizou e ampliou os parâmetros das resoluções anteriores e estabeleceu limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos por fontes fixas.

Já em 2007, a Resolução CONAMA nº 436/11, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007.

3.4. Controle da Emissão de Poluentes do Ar por Fontes Móveis

O estabelecimento de metas para a redução da emissão de gases e materiais particulados (fuligem e gotículas oleosas) por fontes móveis no Brasil, constituídas por veículos automotores, iniciou-se em 1986, quando o CONAMA instituiu, por meio da Resolução nº 18, de 6 de maio daquele ano, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, com os seguintes objetivos:

- Reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores, visando o atendimento aos padrões de qualidade do ar, especialmente nos centros urbanos;

- Promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia automobilística, como também em métodos e equipamentos para ensaios e medições da emissão de poluentes;

- Criar programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso;

- Promover a conscientização da população com relação à questão da poluição do ar por veículos automotores;

- Estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados;

- Promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos, postos à disposição da frota nacional de veículos automotores, visando a redução de emissões poluidoras à atmosfera.

A Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993, que *“dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências”*, reproduziu as metas estabelecidas na Resolução 18/1986 do CONAMA, que alcançavam até o ano de 2002, e delegou ao próprio CONAMA a atualização e o estabelecimento de novas metas.

As Leis nº 10.203, de 22 de fevereiro de 2001, e nº 10.696, de 2 de julho de 2003, alteram a Lei nº 8.723/1993 apenas quanto ao teor de álcool anidro que deve ser adicionado à gasolina automotiva, fixando os limites máximo e mínimo em 20% e 25%, respectivamente.

O controle da emissão de gases e materiais particulados poluentes por veículos automotores está previsto também no Código de Trânsito Brasileiro, instituído pela Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, da qual vale ressaltar os artigos 104 e 131:

“Art. 104. Os veículos em circulação terão suas condições de segurança, de controle de emissão de gases poluentes e de ruído avaliadas mediante inspeção,

que será obrigatória, na forma e periodicidade estabelecidas pelo CONTRAN para os itens de segurança e pelo CONAMA para emissão de gases poluentes e ruído.

“§ 5º Será aplicada a medida administrativa de retenção aos veículos reprovados na inspeção de segurança e na de emissão de gases poluentes e ruído.”

“Art. 131. O Certificado de Licenciamento Anual será expedido ao veículo licenciado, vinculado ao Certificado de Registro, no modelo e especificações estabelecidos pelo CONTRAN.

§ 3º Ao licenciar o veículo, o proprietário deverá comprovar sua aprovação nas inspeções de segurança veicular e de controle de emissões de gases poluentes e de ruído, conforme disposto no art. 104.”

Para atualizar as metas do PROCONVE e atender ao disposto no citado art. 104 do Código de Trânsito Brasileiro, o CONAMA expediu as seguintes Resoluções:

- Resolução CONAMA nº 8 de 1993, de 31 de dezembro de 1993, (publicada no DOU de 31 de dezembro de 1993) - *"Complementa a Resolução nº 018/86, que institui, em caráter nacional, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, estabelecendo limites máximos de emissão de poluentes para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados";*

- Resolução CONAMA nº 16, de 1993, de 17 de dezembro de 1993, (publicada no DOU de 31 de dezembro de 1993) - *"Ratifica os limites de emissão, os prazos e demais exigências contidas na Resolução CONAMA nº 018/86, que institui o Programa Nacional de Controle da Poluição por Veículos Automotores - PROCONVE, complementada pelas Resoluções CONAMA nº 03/89, nº 004/89, nº 06/93, nº 07/93, nº 008/93 e pela Portaria IBAMA nº 1.937/90; torna obrigatório o licenciamento ambiental junto ao IBAMA para as especificações, fabricação, comercialização e distribuição de novos combustíveis e sua formulação final para uso em todo o país";*

- Resolução CONAMA nº 16, de 1994, de 29 de setembro de 1993 - *"Fixa novos prazos para o cumprimento de dispositivos da Resolução CONAMA nº 008/93, que complementa a Resolução nº 018/86, que institui, em caráter nacional, o*

Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, estabelecendo limites máximos de emissão de poluentes para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados";

- Resolução CONAMA nº 27, de 1994, de 7 de dezembro de 1994, (publicada no DOU de 30 de dezembro de 1994) - *"Fixa novos prazos para cumprimento de dispositivos da Resolução CONAMA nº 008/93, que complementa a Resolução nº 018/86, que institui, em caráter nacional, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, estabelecendo limites máximos de emissão de poluentes para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados"*;

- Resolução CONAMA nº 16, de 1995, de 13 de dezembro de 1995, (publicada no DOU de 29 de dezembro de 1995) - *"Complementa a Resolução CONAMA nº 008/93, que complementa a Resolução nº 018/86, que institui, em caráter nacional, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, estabelecendo limites máximos de emissão de poluentes para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados, determinando homologação e certificação de veículos novos do ciclo Diesel quanto ao índice de fumaça em aceleração livre"*;

- Resolução CONAMA nº 17, de 1995, de 13 de dezembro de 1995, (publicada no DOU de 29 de dezembro de 1995) - *"Ratifica os limites máximos de emissão de ruído por veículos automotores e o cronograma para seu atendimento previsto na Resolução CONAMA nº 008/93 (art. 20), que complementa a Resolução nº 018/86, que institui, em caráter nacional, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, estabelecendo limites máximos de emissão de poluentes para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados"*;

- Resolução CONAMA nº 18, de 1995, de 13 de dezembro de 1995, (publicada no DOU de 29 de dezembro de 1995) - *"Determina que a implantação dos Programas de Inspeção e Manutenção para Veículos Automotores em Uso somente poderá ser feita após a elaboração de Plano de Controle de Poluição por*

Veículos em uso - PCPV - em conjunto pelos órgãos ambientais estaduais e municipais".

- Resolução CONAMA nº 226, de 1997, de 20 de agosto de 1997, (publicada no DOU de 29 de agosto de 1997) - *"Estabelece limites máximos de emissão de fuligem de veículos automotores"*;

- Resolução CONAMA nº 251, de 1999, de 7 de janeiro de 1999, (publicada no DOU de 12 de janeiro de 1999) - *"Estabelece critérios, procedimentos e limites máximos de opacidade da emissão de escapamento para avaliação do estado de manutenção dos veículos automotores do ciclo Diesel"*;

- Resolução CONAMA nº 272, de 2000, de 14 de setembro de 2000, (publicada no DOU de 10 de janeiro de 2001) - *"Define novos limites máximos de emissão de ruídos por veículos automotores"*;

- Resolução CONAMA nº 315, de 2002, de 29 de outubro de 2002, (publicada no DOU de 20 de novembro de 2002) - *"Dispõe sobre a nova etapa do Programa de Controle de Emissões Veiculares - PROCONVE"*.

- Resolução CONAMA nº 342, de 2003, de 25 de setembro de 2003 (publicada no DOU de 10 de dezembro de 2002) – *"Estabelece novos limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos, em observância à Resolução nº 297, de 26 de fevereiro de 2002, e dá outras providências"*.

- Resolução Conama nº 403/2008 – *"Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores PROCONVE para veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências"*.

- Resolução Conama nº 415/2009 – *"Dispõe sobre nova fase (PROCONVE L6) de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário e dá outras providências"*.

- Resolução Conama nº 433/2011– “Dispõe sobre a inclusão no Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores PROCONVE e estabelece limites máximos de emissão de ruídos para máquinas agrícolas e rodoviárias novas”.

Vê-se, portanto, que o controle da emissão de gases e material particulado poluentes por fontes móveis está amplamente regulamentado pela legislação ambiental brasileira (PEREIRA JUNIOR, 2007).

3.5. Relação COVID-19 e Poluição do Ar

O estudo feito por Gonzaga *et. al.* (2020), que relaciona a COVID-19 com as condições meteorológicas e poluição do ar, determinou que fatores como material particulado, quando em concentrações altas, podem diminuir a eficiência imunológica, aumentando assim os riscos de fatalidade causados pela COVID-19. O vírus sobrevive por algumas horas em superfícies e, quando em contato com o sistema respiratório, a pessoa é infectada de modo que o portador pode ter sintomas da doença ou não. A disseminação do vírus pode ser pressuposta por partículas atmosféricas, por isso se faz importante estudar os parâmetros de qualidade do ar.

Gonzaga *et. al.* (2020) apontou que o enxofre reduzido total presente na atmosfera também possui correlação com os números de óbitos por COVID-19, bem como o material particulado grosso e fino e a pressão atmosférica, que quando aumentada, há um acréscimo na estabilidade atmosférica e a dispersão de poluentes diminui, fator que prejudica a qualidade do ar e favorece o número de óbitos por coronavírus. A umidade relativa do ar, temperatura e velocidade dos ventos apresentam pouca relação aos números de óbitos pela doença, já que temperaturas baixas indicam menor dispersão de poluentes, bem como a velocidade média dos ventos.

3.6. Sensoriamento remoto na qualidade do ar

O sensoriamento remoto vem sendo utilizado com o passar dos anos, como alternativa tecnológica de avaliação de impactos ambientais no meio rural e urbano. O sensoriamento é realizado por meio de satélites, que apresentam sensores que

medem a radiação eletromagnética emitida e/ou espalhada na atmosfera. Os sensores podem ser classificados ainda como sensores ativos, ou seja, que possuem energia eletromagnética própria, ou sensores passivos, que não possuem energia eletromagnética própria. (DE MORAES, 2002)

Os satélites mais comuns utilizados para análise da qualidade do ar são o MODIS, o Landsat, o Terra e o Aqua. Os satélites utilizados nos experimentos são o Satélite AURA e o modelo MERRA-2 da NASA.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os parâmetros MP_{10} , $MP_{2.5}$, O_3 , CO , NO e NO_2 foram adquiridos por meio do banco de dados online da Companhia ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), o Sistema de informações da qualidade do ar (QUALAR) dos anos de 2017 a 2020, onde seis estações de monitoramento da qualidade do ar na RMSP foram selecionadas (Figura 2): Grajaú-Parelheiros (LAT: 7369511;LON: 327086), Ibirapuera (LAT: 7389978;LON: 330545) , Itaim Paulista (LAT: 7400240;LON: 354934), Parque Dom Pedro (LAT: 7395221;LON: 333855), Pinheiros (LAT: 7393293;LON: 326287) e São Caetano do Sul (LAT: 7387152;LON: 341225). A seguir segue mapa de localização das estações meteorológicas, com marcadores de cor roxa, feitas no Google Earth.

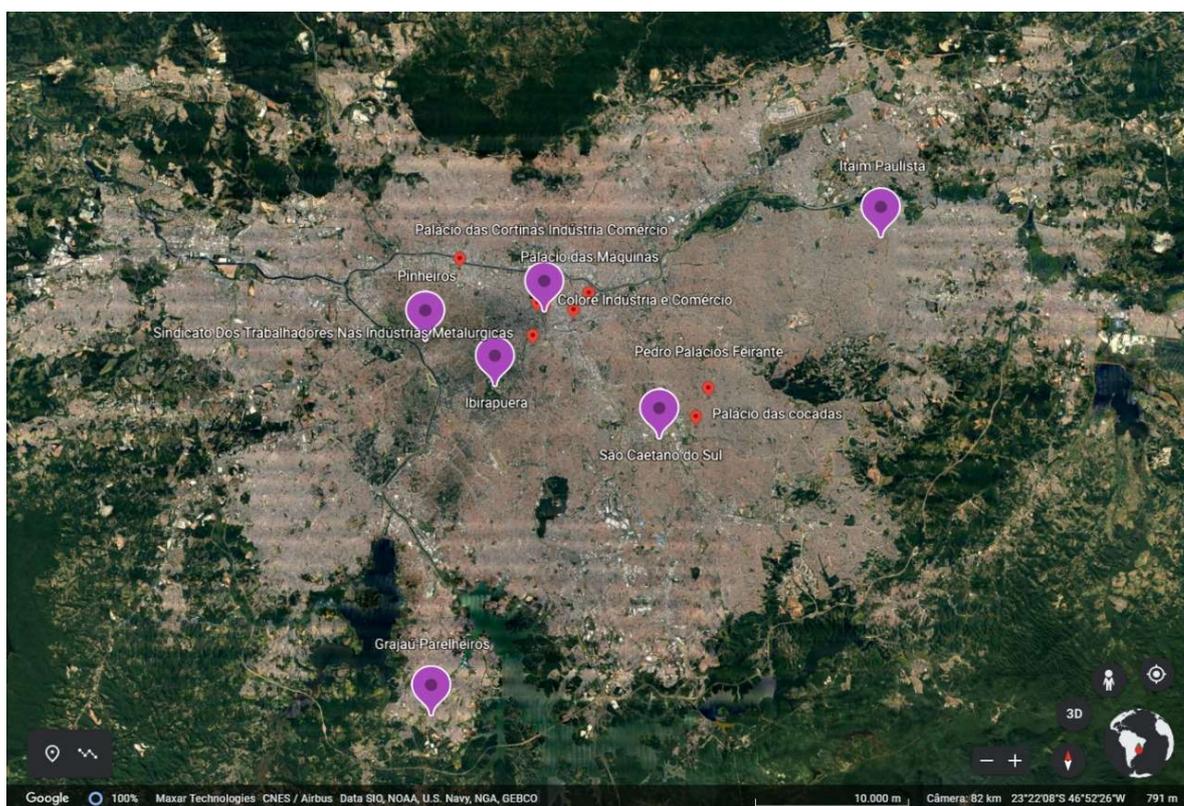


Figura 2 – Mapa de localização das estações meteorológicas da CETESB, da RMSP.

Foram calculadas as médias horárias, utilizando o Excel, correspondentes aos meses de abril e maio, para cada uma das estações, resultando em ciclos

diários (24 horas) dos poluentes, o que permite uma averiguação harmoniosa dos impactos das concentrações sobre a região. Isso foi realizado durante todas as 24 horas do dia, resultando em um ciclo diurno que representa todos os valores horários médios. Em seguida foram determinadas as médias horárias, resultando em dois ciclos diurnos: sem pandemia do COVID-19 abril e maio (2017-2019), de forma a melhor caracterizar uma média; e o mesmo período com a quarentena (2020) da pandemia. Além disso, as variações nas concentrações médias ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm) foram calculadas para avaliar a mudança relativa (%) comparando o período de bloqueio parcial durante a pandemia (2020) com a tendência mensal dos três anos anteriores sem a pandemia. Para plotagem dos gráficos de dispersão foi utilizado o programa *RStudio*, que consiste em executar códigos de programação em linguagem R para criar gráficos de fácil visualização e entendimento.

Para a realização das análises sobre a região Sudeste brasileira foram utilizados dados de concentração de NO_2 do sensor OMI (*Ozone Monitoring Instrument*) a bordo do satélite AURA e dados de CO, SO_2 e *black carbon* (BC) proveniente do MERRA versão 2 (MERRA-2). As reanálises atmosféricas do MERRA-2 produzem registros de longo prazo de alta resolução espacial de 0,25 graus (aproximadamente 25 km) e interpolados para uma de 12,5 Km e resolução temporal de 6 horas, de campos meteorológicos e composição da atmosfera da Terra, utilizando a metodologia de assimilação de dados (KALNAY, 2002), em que observações de satélite e terrestres são combinadas com o modelo de circulação geral (GCM) simulações de forma estatisticamente ótima.

Nesta pesquisa as concentrações na superfície de NO_2 provenientes do sensor OMI e os dados de CO, SO_2 e BC provenientes do MERRA-2 são referentes a médias mensais na região sudeste do Brasil para o período de abril e maio de 2020 (período da pandemia do COVID-19) e comparados com o mesmo período referente aos anos de 2017 até 2019 (sem pandemia), a linguagem utilizada para produzir as figuras de concentração dos poluentes foi a linguagem de comando NCL do Centro Nacional de Pesquisas Atmosféricas (NCAR).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Parâmetros meteorológicos e poluentes da RMSP

Foram utilizados apenas os parâmetros meteorológicos das estações de monitoramento da qualidade do ar do Parque Dom Pedro e São Caetano do Sul já que as outras três estações de monitoramento da qualidade do ar deste estudo não possuíam dados meteorológicos, considerando a média de abril e maio de 2017-2019 (anos sem pandemia COVID-19) com o mesmo período em 2020 (ano com pandemia). No período da pandemia, a velocidade do vento estava 1,2% em média maior na RMSP e a precipitação foi praticamente a mesma nos períodos com e sem pandemia, sem alterações significativas comparado com o ano de 2020.

Durante o *lockdown* parcial, a umidade relativa esteve 6,4% menor, a temperatura 9,2% mais baixa e radiação global 11% mais alta, este aumento da radiação solar global pode estar relacionado a diminuição da emissão de material particulado de origem antropogênica, principalmente carbono orgânico. A comparação entre os diferentes anos indicou que as reduções de poluentes observadas durante o período da pandemia não foram altamente determinadas por mudanças nas condições de dispersão.

Na Figura 3 são apresentadas as concentrações médias horárias de CO do período de abril e maio de 2017, 2018 e 2019 (anos sem pandemia COVID-19) e para o mesmo período referente ao ano de 2020 com pandemia. Observa-se que o padrão das concentrações não mudou quando se compara os dois períodos.

Na RMSP, 97% do poluente CO emitido é proveniente da emissão veicular, justificando o aumento nas concentrações a partir das 6:00 até 9:00 da manhã, horário de maior tráfego veicular, conforme observa-se na Figura 5. Após este horário, as concentrações diminuem e voltaram a aumentar a partir das 17:00 horas até às 20:00 horas, coincidindo novamente com o pico do trânsito na RMSP.

Houve diminuição média de 71,6%, 68,7%, 65,4% e 21,7% nas concentrações de CO para as estações de monitoramento do Grajaú-Parelheiros, Pinheiros, Parque Dom Pedro, e São Caetano do Sul e um aumento de 10,7% para estação do Ibirapuera, onde ficava localizado o hospital de campanha especializado em atendimento de COVID-19. A estação Ibirapuera fica mais distante da fonte

veicular; é uma localidade onde os poluentes primários têm concentrações mais baixas quando comparadas a estações próximas de vias mais movimentadas, porém o poluente secundário O₃ é alto nesta estação.

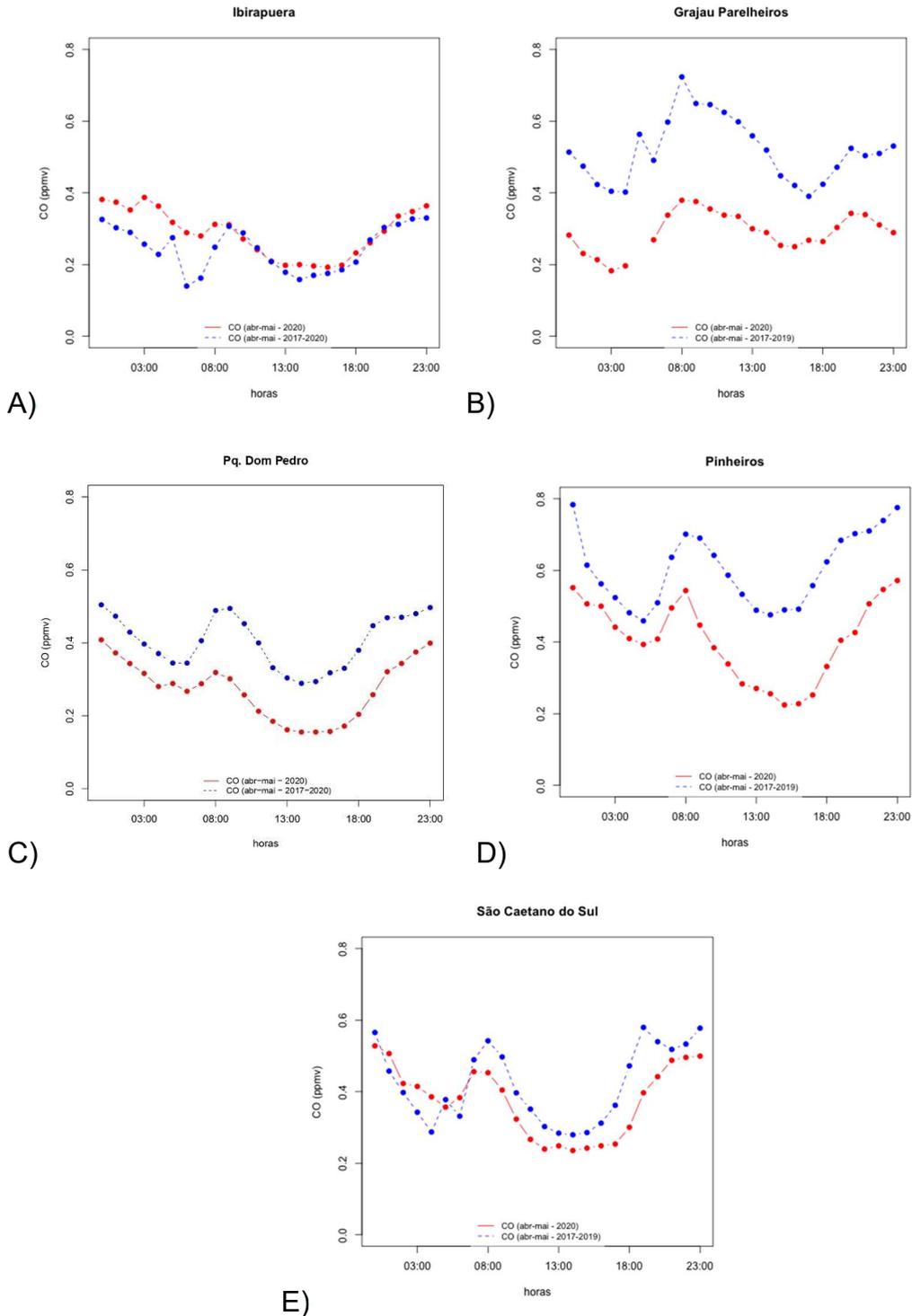


Figura 3 - Concentração de CO (ppm) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia COVID-19 (2017-2019) e com pandemia (2020).

Um estudo realizado utilizando dados da rede de monitoramento de qualidade do ar - CETESB na cidade de São Paulo e Cubatão (costa sul do estado de São Paulo), comparando dados do período do bloqueio parcial no estado de São Paulo no mês de abril de 2020 *versus* a média mensal dos cinco anos anteriores (2015, 2016, 2017, 2018 e 2019) para o mesmo período relatou a diminuição nas concentrações de CO de 53,1% e 64,8% para medidas na cidade de São Paulo (NAKADA et al., 2020). Em outro estudo realizado na cidade do Rio de Janeiro comparando a última metade do mês de março com a primeira metade do mês de abril 2019 com mesmo período para 2020 foi observado diminuição média de 38% e 36,4% na região de Bangu e Tijuca, respectivamente (DANTAS et al., 2020).

Na Figura 4 são apresentadas as concentrações médias horárias de NO do período de abril e maio de 2017, 2018 e 2019 (anos sem pandemia COVID-19) e para o mesmo período referente ao ano de 2020 com pandemia. A estação Ibirapuera teve diminuição de NO de 316,4% quando comparado o período deste estudo durante a pandemia COVID-19 no ano de 2020 com a média para o mesmo período dos três anos anteriores. Então é possível concluir que houve menos tráfego de veículos a diesel próximo à esta estação, em detrimento da situação de *lockdown*.

Na estação de Itaim Paulista houve diminuição de 16,4% em relação à média dos anos sem pandemia, pois o tráfego de veículos pesados nesta região é mais baixo do que as demais estações de monitoramento da qualidade do ar utilizadas neste estudo. Nas estações do Pq. Dom Pedro e São Caetano do Sul demonstram redução de 88,3% e 85,5%, respectivamente. Para a estação Pinheiros houve uma redução nas concentrações de NO de 149,9%. Em geral, as concentrações de NO durante a pandemia foram 131,3 % menores durante a pandemia que a média dos anos anteriores de 2017, 2018, 2019, principalmente próximas às estações Pinheiros e Pq. Dom Pedro que ficam próximas de vias com tráfego de veículos pesados, a estação Pinheiros é próxima de uma das principais vias da cidade de São Paulo a Marginal Pinheiros com alto tráfego de caminhões e a estação Pq. Dom Pedro fica próxima a um terminal de ônibus urbano e também à região onde há tráfego de caminhões que são veículos que utilizam diesel como combustível.

Uma pesquisa recente demonstrou que as emissões de tráfego de veículos

pesados a diesel são as principais fontes de NO (HE et al., 2020). Os horários com concentração mais altas tanto no período do *lockdown* parcial quanto no período sem o *lockdown* ocorrem durante o horário de pico do tráfego veicular das 7:00 às 11:00 durante o período da manhã e a partir das 19:00 da noite as concentrações voltam a aumentar devido a fatores como a emissão veicular, diminuição da altura da camada limite, falta da produção de O₃ à noite (que consome NO durante o dia).

Um estudo realizado utilizando dados da rede de monitoramento de qualidade do ar CETESB na cidade de São Paulo e Cubatão (costa sul do estado de São Paulo), comparando dados do período do bloqueio parcial no estado de São Paulo no mês de abril de 2020 versus a média mensal dos cinco anos anteriores (2015, 2016, 2017, 2018 e 2019) para o mesmo período relatou um aumento nas concentrações de NO de 8% para as medidas realizadas em Cubatão uma estação de monitoramento localizada na costa sul do estado de São Paulo onde fica o maior polo industrial da América Latina, com indústrias de fertilizantes, siderúrgicas, química e petroquímica. Este mesmo estudo utilizou dados de concentração de NO na cidade de São Paulo e encontrou uma diminuição média de 75% de NO (Nakada et al. 2020).

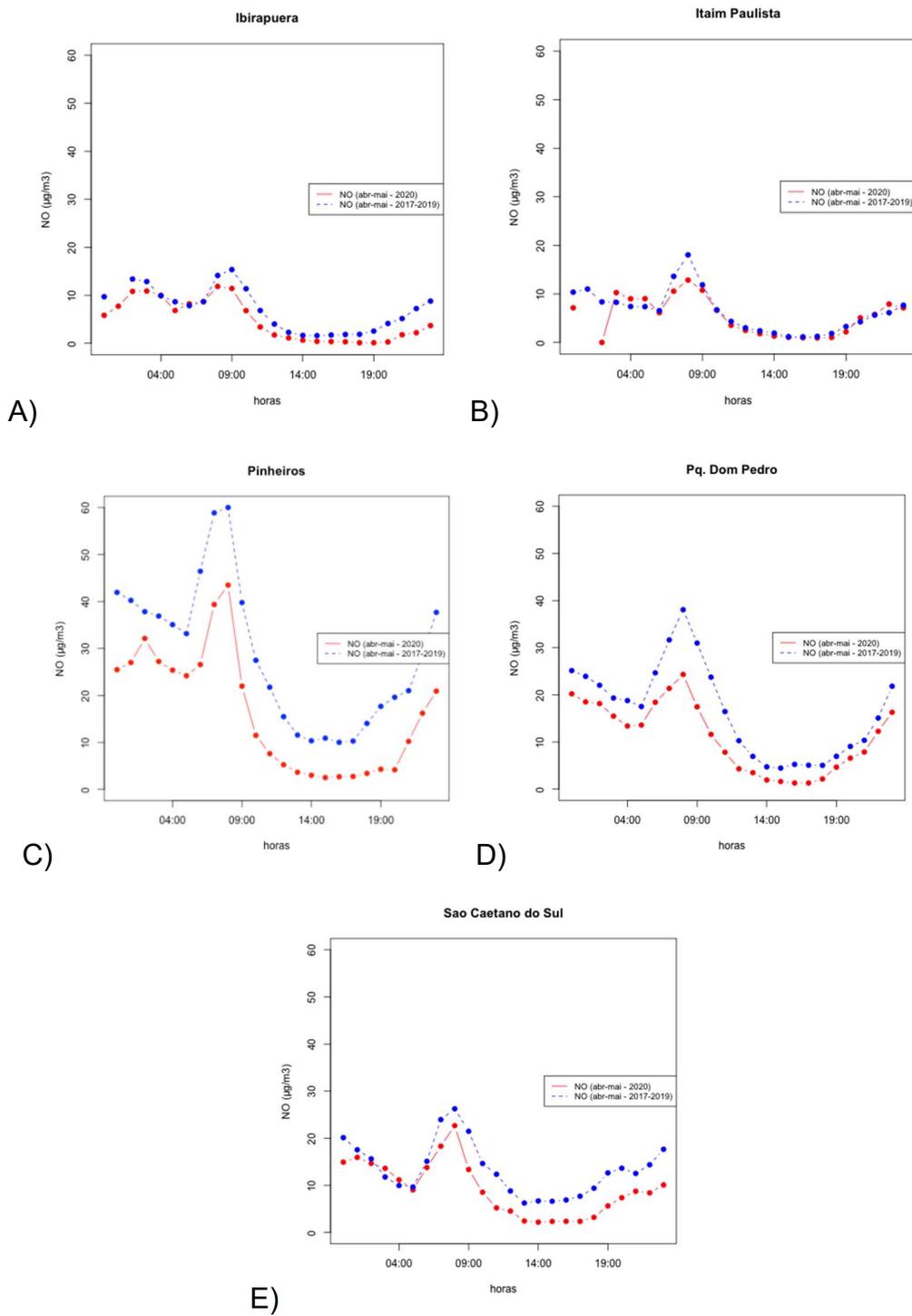


Figura 4 - Concentração de NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia Covid-19 (2017-2019) e com pandemia (2020)

Na Figura 5 são apresentadas as concentrações médias horárias de NO_2 do período de abril e maio de 2017, 2018 e 2019 (anos sem pandemia COVID-19) e

para o mesmo período referente ao ano de 2020 com pandemia. Temos as concentrações de NO₂ menores em 23,4% para a estação de Itaim Paulista, em comparação aos anos posteriores à pandemia nos meses de abril e maio.

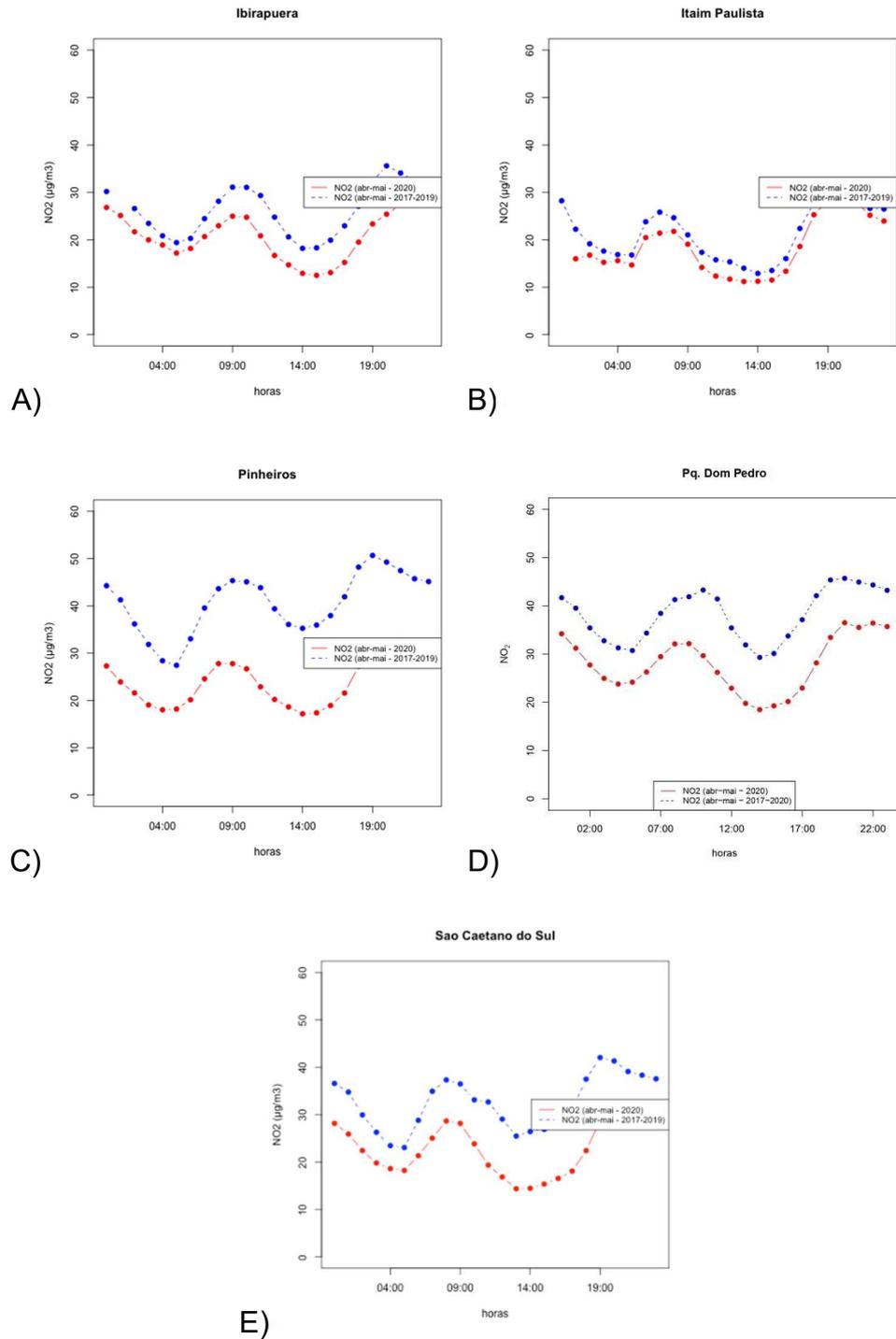


Figura 5 - Concentração de NO₂ (µg/m³) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia COVID-19 (2017-2019) e com pandemia (2020)

Na estação Pinheiros houve diminuição em 71,9% no período de *lockdown* como já mencionado acima este ponto de monitoramento está localizado próximo da Marginal Pinheiros uma via com tráfego intenso de veículos pesados, sendo a estação com maior percentual de redução de todas as análises de NO₂, enquanto para as estações do Pq. Dom Pedro e São Caetano do Sul tiveram o percentual de médias horárias de emissão em 38,7% e 47,2%. Já a estação de Ibirapuera teve redução de 29,1%. Há um aumento das concentrações de NO₂ durante o período da manhã das 6:00 até 10:00 para os dois períodos deste estudo sem e com pandemia, tendo a contribuição da emissão veicular, mas também uma formação de NO₂ secundário na atmosfera pela oxidação do NO com O₃ e pela oxidação dos radicais de COV com NO. As concentrações de NO₂ diminuem a partir da 12:00 até as 16:00, coincidindo com horário de maior concentração de O₃ na RMSP, e maior radiação, onde NO₂ está sofrendo reação de fotólise, formando NO e oxigênio atômico (O). As concentrações voltam a aumentar a partir das 18:00 devido ao horário de pico do tráfego veicular.

Um estudo realizado utilizando dados da rede de monitoramento de qualidade do ar CETESB na cidade de São Paulo e Cubatão (costa sul do estado de São Paulo), comparando dados do período do bloqueio parcial no estado de São Paulo no mês de abril de 2020 versus a média mensal dos cinco anos anteriores (2015, 2016, 2017, 2018 e 2019) para o mesmo período relatou a diminuição nas concentrações de NO₂ de 48,6% e 72,7% para medidas em dois pontos de monitoramento na cidade de São Paulo e as medidas em Cubatão maior polo industrial da América Latina houve redução de apenas 5.6% (NAKADA et al., 2020), demonstrando a importância das fontes industriais de NO_x. Isto também pode estar relacionado ao fato de que não houve a mesma queda de NO₂ durante a greve dos caminhoneiros, um cenário com menor emissão veicular, porém, quando as indústrias continuaram operando (CHIQUETTO et al., 2020). Em um estudo realizado na cidade do Rio de Janeiro comparando a última metade do mês março com a primeira metade do mês de abril 2019 com mesmo período para 2020 foi observado diminuição de NO₂ média de 27% e 24% na região de Bangu e Tijuca, respectivamente (DANTAS et al., 2020). De qualquer forma, as quedas menos intensas de NO₂ em relação ao CO e o NO demonstram sua menor reatividade e

sugerem a importância da fração secundária deste poluente na RMSP.

Na Figura 6 são apresentadas as concentrações médias horárias de O₃ do período de abril e maio de 2017, 2018 e 2019 (anos sem pandemia COVID-19) e também para o mesmo período referente ao ano de 2020 com pandemia.

Na Figura 6, comparando o período deste estudo da pandemia COVID-19 com o período sem pandemia, é possível observar um aumento nas concentrações de O₃ de 31,8% no Ibirapuera, Itaim Paulista 22,9%, Pinheiros 30,1%, Pq. Dom Pedro 23,8% e São Caetano do Sul 23,5% e uma diminuição de O₃ de 19,3% na estação Grajaú Parelheiros comportamento atípico, pois na RMSP geralmente quando diminui as concentrações de NO_x ocorre aumento de O₃, seria importante ter os dados de NO_x para estação do Grajaú Parelheiros, porém neste ponto de monitoramento não há medida de NO_x. A concentração de O₃ começa a aumentar a partir das 9:00 devido a emissão dos poluentes primários e precursores de O₃ como CO, COV e NO_x nas primeiras horas da manhã que coincide com o horário de pico de tráfego veicular. A formação do O₃ ocorre mais tarde após a emissão dos poluentes primários e da disponibilidade de luz solar, atingindo seu máximo de concentração das 13:00 às 15:00 horas. No horário da noite, o O₃ não é mais formado devido a falta da luz solar, sendo apenas consumido pelo NO₂ formando NO₃, que formará pentóxido de dinitrogênio (N₂O₅).

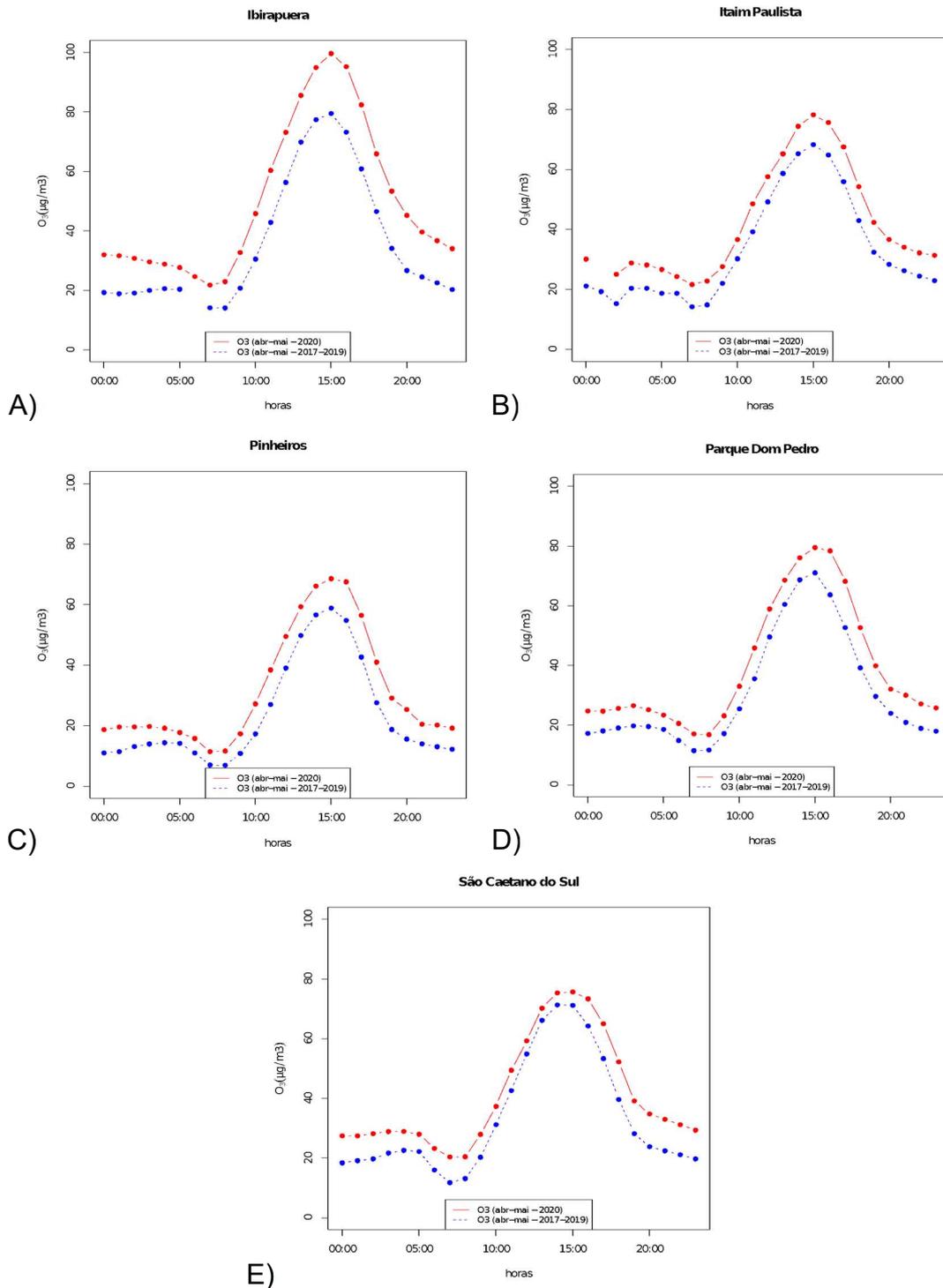


Figura 6 - Concentração de O₃ (µg/m³) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia COVID-19 (2017-2019) e com pandemia (2020).

Na Figura 6 são apresentadas as concentrações médias horárias de MP2.5 do período de abril e maio de 2017, 2018 e 2019 (anos sem pandemia COVID-19) e

também para o mesmo período referente ao ano de 2020 com pandemia.

O MP_{2.5} (Figura 7) diferentemente dos poluentes como CO, NO e NO₂ que teve diminuição das concentrações praticamente em todos os pontos de monitoramento da qualidade do ar neste estudo, com exceção do CO que teve aumento de 11% em um dos 6 locais de estudo (estação Ibirapuera), o MP_{2.5} diminuiu a concentração na estação Ibirapuera durante todos os horários no período da pandemia em relação ao mesmo período sem pandemia. Já na estação do Itaim Paulista, há um aumento na concentração das 21:00 até às 11:00 horas no período da pandemia e depois a concentração diminui das 12:00 até às 20:00. Na estação Grajaú-Parelheiros há uma grande diminuição do MP_{2.5} a partir das 9:00 até às 15:00.

Na estação Pinheiros há um aumento das concentrações de MP_{2.5} a partir das 12:00 até às 19:00, comparando o período de pandemia com o período sem pandemia. Estação Pq. Dom Pedro não observa diferenças quantitativas entre o período com *lockdown* parcial e o sem *lockdown*. Considerando a média das concentrações de MP_{2.5} comparando o período do *lockdown* parcial e sem o *lockdown* houve diminuição para as estações Grajaú-Parelheiros 19,8%, Ibirapuera 33,3%, São Caetano do Sul 24,5%. Para estação Itaim Paulista considerando a média de todos os horários não observamos diferenças significativas entre o período com pandemia e o período sem pandemia, ocorrendo diminuição do 12:00 até às 20:00 e aumento das concentrações das 21:00 até às 11:00 horas. Para a estação Pq. Dom Pedro ocorreu aumento médio de 6,6% durante o período da pandemia.

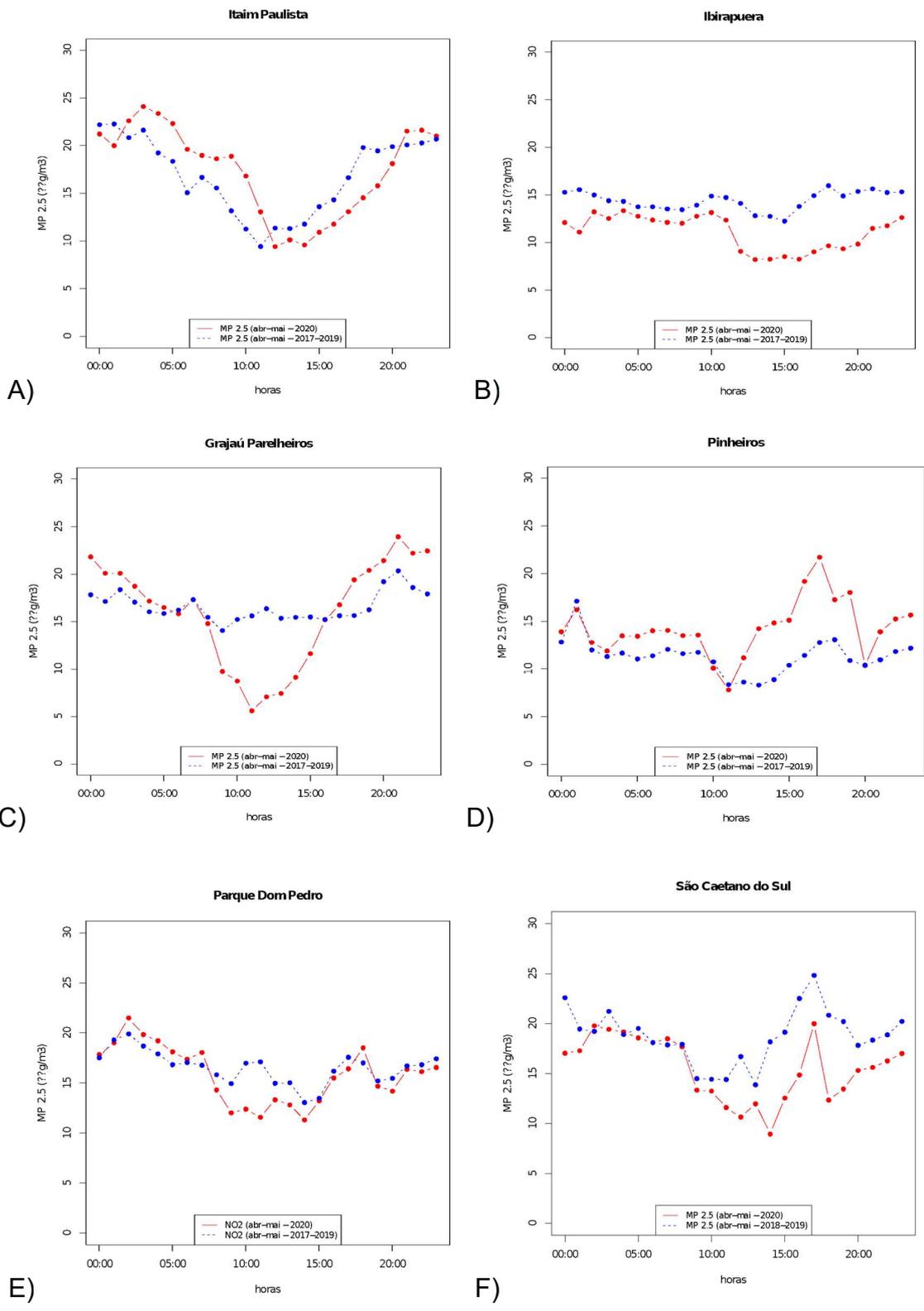


Figura 7 - Concentração de $MP_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) na RMSP média horária do período de abril e maio sem pandemia de COVID-19 (2017-2019) e com pandemia (2020).

5.2. Parâmetros meteorológicos e poluentes do Sudeste

Foram observadas melhorias significativas na qualidade do ar considerando reduções nos poluentes do ar monitorados em áreas altamente influenciadas pelo tráfego de veículos com a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e do Rio de Janeiro (RMRJ).

Pode ser observado na Figura 8 que ocorreu a diminuição de 10 a mais de 60% da concentração de NO₂ sobre a RMSP e RMRJ. Já na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e Vitória e (RMV), houve diminuição em torno de 10%. Essa diferença pode ser explicada já que, como o Brasil é um país com 8,5 milhões de km², a pandemia do COVID-19 iniciou com maior impacto no estado de São Paulo e do Rio de Janeiro e foi se espalhando para outras regiões do país, principalmente as mais populosas.

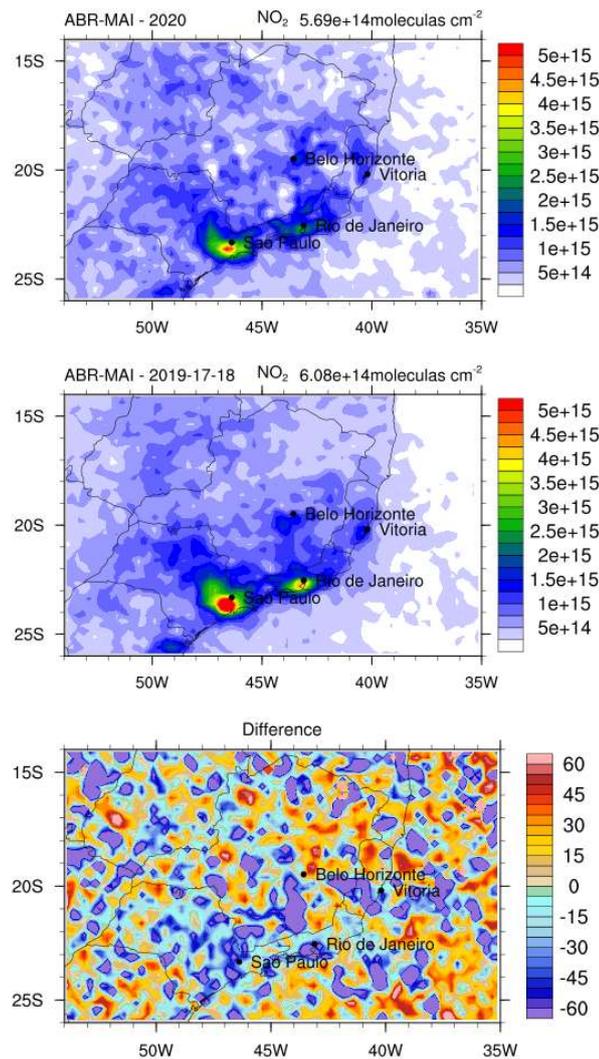
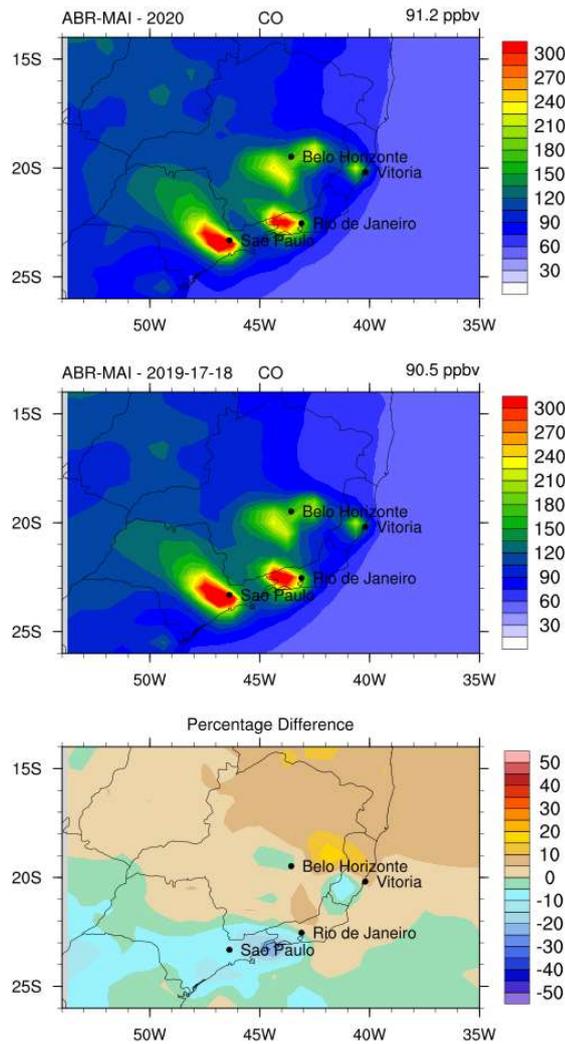


Figura 8 – Concentração superficial de NO₂ para o período de abril e maio com pandemia (2020) e sem pandemia COVID-19 (2017-2019) provenientes do sensor OMI.

Na Figura 9 estão apresentadas as concentrações na superfície de CO provenientes do MERRA-2. Observa-se uma redução em torno de 10% durante o período do bloqueio parcial pela causa da COVID-19 sobre quase todo estado de São Paulo, principalmente na divisa do estado de São Paulo com o Rio de Janeiro, onde ocorreu neste período diminuição do fluxo de veículos leves e pesados nesta região. Já sobre Belo Horizonte e Vitória há um menor impacto, pois, as duas regiões na época estavam menos afetadas pelos casos de COVID-19.



1.

Figura 9 – Concentração superficial de CO para o período de abril e maio com pandemia (2020) e sem pandemia COVID-19 (2017-2019) provenientes do MERRA-2.

Na Figura 10 são apresentadas as concentrações na superfície de SO₂ provenientes do MERRA-2. Observa-se que houve redução de 5 a 10% sobre a RMSP e RMRJ e sobre o oeste de RMBH e diminuição de 30 a 50% na divisa do estado de São Paulo com estado do Rio de Janeiro. Já na região de RMV observa-se aumento do poluente, pois no período deste estudo esta região ainda não estava altamente impactada pela pandemia do COVID-19.

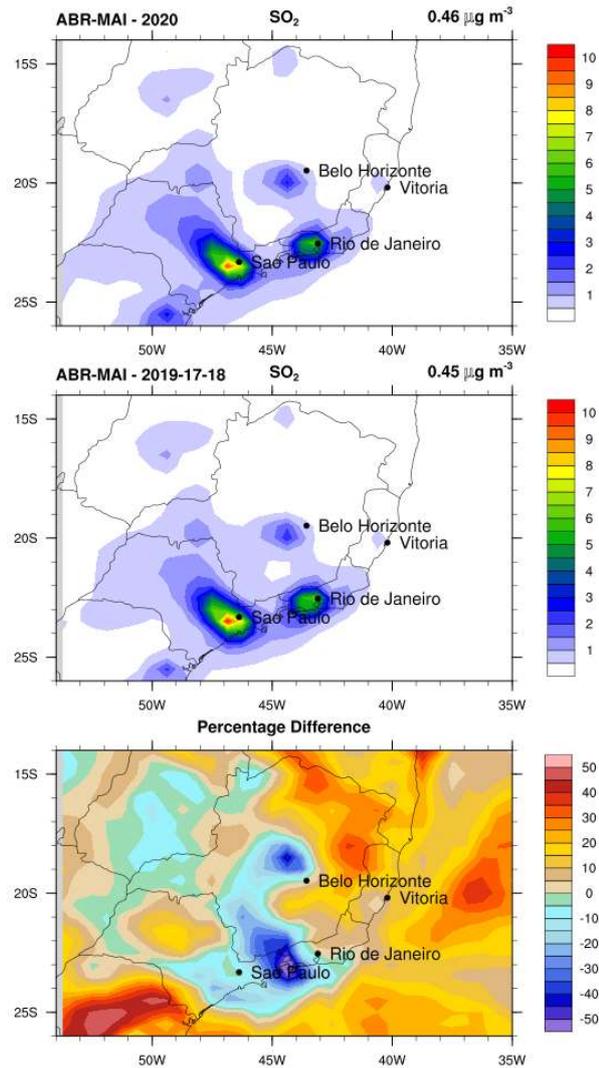


Figura 10 – Concentração superficial de SO₂ para o período de abril e maio com pandemia (2020) e sem pandemia Covid-19 (2017-2019) provenientes do MERRA-2.

A Figura 11 apresenta as concentrações na superfície de BC provenientes do MERRA-2. Ocorreu a diminuição de 5 a 10% da concentração de BC sobre a RMSP e na divisa do estado de São Paulo com o Rio de Janeiro provavelmente devido a diminuição do tráfego de caminhões movidos a diesel. Já na Região Metropolitana de Belo Horizonte e Vitória (RMBH) não ocorre diminuição deste poluente, pois no período deste estudo os dois locais ainda não tinham sido muito afetados pelos casos de COVID-19.

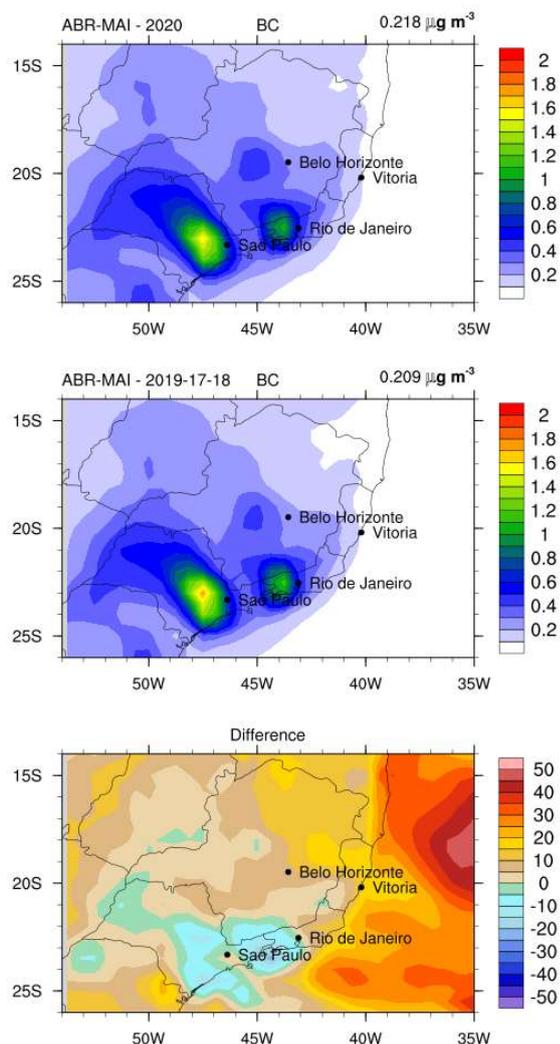


Figura 11 – Concentração superficial de BC para o período de abril e maio com pandemia (2020) e sem pandemia COVID-19 (2017-2019) provenientes do MERRA-

6. CONCLUSÃO

Esses resultados mostraram o impacto do bloqueio parcial na qualidade do ar da Região Metropolitana de São Paulo. O confinamento parcial da população, a redução do tráfego rodoviário e da atividade econômica levaram à diminuição dos níveis de CO, NO e NO₂ e, ao contrário, ao aumento das concentrações de ozônio. Resultados semelhantes foram observados em 2018, durante uma greve de caminhoneiros de 10 dias. Poluentes primários diretamente associados às emissões veiculares, como CO e NO, diminuíram drasticamente em abril e maio de 2020 na

RMSP durante o *lockdown* parcial. Diferenças estatisticamente significativas entre os períodos com e sem pandemia foram observadas em quase todas as estações analisadas para esses poluentes. As concentrações de NO reduziram em média de 131%, e as concentrações de CO também diminuíram (em 43%) comparando o período do *lockdown* parcial em 2020 com o mesmo período para os três anos anteriores. Para NO₂ a redução média foi de 44%. Em relação ao MP_{2.5}, houve queda em 3 estações, uma média de 26% menor, aumento de 18,2% na estação Pinheiros, ou estabilidade na estação Pq. Dom Pedro, demonstrando a complexidade deste poluente constituído de diversas fontes diferentes, incluindo muitas reações secundárias na atmosfera. Para o O₃, as concentrações aumentaram numa média de 26%. Em teoria, este aumento de O₃ ocorreu devido a diminuição de NO_x em um sistema NO_x, saturado como na RMSP, onde a diminuição das concentrações de NO_x aumenta o O₃, e a diminuição das concentrações de COV diminui o O₃. Esses resultados mostram que a poluição da RMSP está sob considerável influência das emissões veiculares. Claramente, melhorias nas emissões veiculares diretamente dos escapamentos dos veículos, manutenção e qualidade de todos os tipos de combustíveis são necessárias para diminuir as emissões primárias, bem como a implementação de melhores condições de mobilidade urbana e transporte coletivo, trariam resultados positivos diretos na saúde da população da RMSP.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIM, D. S. *et al.* **Greve dos caminhoneiros e a diminuição do poluentes monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio e o aumento do ozônio na Região Metropolitana de São Paulo.** In: COSTA, L. R. F. DA (Ed.). *Geociências: Estabelecimento e Evolução da Civilização Humana 2.* 1. ed. [s.l.] Atena Editora p. 35–53. 2020.

A Política Nacional de Meio Ambiente e os instrumentos de gestão ambiental. **Oficina de Textos. São Paulo, 2018. Disponível em:** <<http://https://www.ofitexto.com.br/comunitexto/a-politica-nacional-de-meio->

ambiente-e-os-instrumentos-de-gestao-ambiental/> Acesso em: 23 de Março de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12065 - Atmosfera - determinação da taxa de poeira sedimentável total**. Rio de Janeiro, 1991.

BRASIL. **Ministério da Saúde – COVID19 – Painel Coronavírus**, 21 de Maio de 2022. Disponível em: <<https://covid.saude.gov.br/>>. Acesso em: 21 de Maio de 2022.

CADOTTE, M. **Early evidence that COVID-19 government policies reduce urban air pollution**. [s.l.] Physical Sciences and Mathematics, 30 mar. 2020. Disponível em: <<https://eartharxiv.org/repository/view/345>>. Acesso em: 11 nov. 2020.

CETESB. **Air Quality Report for the Sao Paulo State 2019**. [s.l.] Environmental Agency of the State of São Paulo, 2020.

CHIQUETTO, J. B. et al. Impact of a truck Driver's strike on air pollution levels in São Paulo. **Atmospheric Environment**, p. 118072, nov. 2020.

CRODA, J. et al. COVID-19 in Brazil: advantages of a socialized unified health system and preparation to contain cases. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 53, p. e20200167, 2020.

DANTAS G, SILICIANO B, FRANÇA B.B. , DA SILVA C.M. , ARBILLA G. The impact of COVID-19 partial *lockdown* on the air quality of the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Sci Total Environ*. 2020

DE MORAES, Elisabete Caria. **Capítulo 1: fundamentos de sensoriamento remoto**. 2002.

GONZAGA, A. C.; FREITAS, A. C. V. **Análise da relação entre condições meteorológicas, poluição atmosférica e infecções respiratórias virais: o caso COVID-19**. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 8, 2020.

HE, L. et al. On-road emission measurements of reactive nitrogen compounds from

heavy-duty diesel trucks in China. **Environmental Pollution**, v. 262, p. 114280, jul. 2020.

IBGE. **2018 Brazilian census**. [s.l.] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022.

RESENDE, Fernando. **Poluição atmosférica por emissão de material particulado: avaliação e controle nos canteiros de obras de edifícios**. - São Paulo: EPUSP, 2008. 23 p. - (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/485).

NAKADA, L. Y. K.; URBAN, R. C. COVID-19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial *lockdown* in São Paulo state, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 730, p. 139087, ago. 2020.

PEREIRA JÚNIOR, José de Sena. **Legislação brasileira sobre poluição do ar**. Câmara dos Deputados. 2007. 12 p. Disponível em: <http://bd.camara.gov.br/bd/handle/bdcamara/1542>. Acesso em: 22 de Março de 2022.

SÃO PAULO. São Paulo São Paulo State – Decreto n. 64.881, de 22 de Março de 2020. 2020.

SEADE. **Covid**. São Paulo: Seade. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados, 11 nov. 2020. Disponível em: <https://www.seade.gov.br/coronavirus/>. Acesso em: 11 nov. 2020.

SHARMA, S. *et al.* Effect of restricted emissions during COVID-19 on air quality in India. **Science of The Total Environment**, v. 728, p. 138878, ago. 2020.

TOBIÁS, A. *et al.* Changes in air quality during the *lockdown* in Barcelona (Spain) one month into the SARS-CoV-2 epidemic. **Science of The Total Environment**, v. 726, p. 138540, jul. 2020.

WANG, H. *et al.* Global, regional, and national life expectancy, all-cause mortality,

and cause-specific mortality for 249 causes of death, 1980–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. **The Lancet**, v. 388, n. 10053, p. 1459–1544, out. 2016.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION) WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). **WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020**, 11 mar. 2020. Disponível em: <<https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>>. Acesso em: 11 de Abril de 2022.

Zambrano-Monserrate, M. A., Ruano, M. A., e Sanchez-Alcalde, L. Indirect effects of COVID-19 on the environment. *Science of the Total Environment*. 2020.

KANNIAH, K. D. et al. COVID-19's impact on the atmospheric environment in the Southeast Asia region. **Science of The Total Environment**, v. 736, p. 139658, set. 2020.