



Universidade Federal
do Espírito Santo

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

RAQUEL DA CRUZ SARCINELLI DOS SANTOS

**QUALIDADE DO AR NO MUNICÍPIO DE SERRA-ES: AVALIAÇÃO A
PARTIR DE MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA**

VITÓRIA
AGOSTO 2022

RAQUEL DA CRUZ SARCINELLI DOS SANTOS

**QUALIDADE DO AR NO MUNICÍPIO DE SERRA-ES: AVALIAÇÃO A
PARTIR DE MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Ambiental do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Elisa Valentim
Goulart

VITÓRIA

AGOSTO DE 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Jussara e Claudio, por todo amparo e suporte fornecido durante toda minha vida. Sem eles nada disso teria sido possível. Além disso, agradeço a Família Cruz por toda confiança e apoio.

À minha orientadora Elisa Valentim Goulart por todo conhecimento e contribuição fornecida. E sou grata por ter sua orientação acadêmica desde 2019 quando aceitou ser minha orientadora no projeto de Iniciação Científica.

A todos amigos que fiz durante a graduação que compartilharam comigo todas angústias e alegrias vividas na universidade. Em especial à Ana Karolina, Ainoã, Anna Claudia, Atila, Bruno, Danielsan, Igor, Izadora, Lara, Leticia Velasco e Luana Kiefer.

Aos meus melhores amigos Delani, Jeniffer, Izabel, Marília, Augusto, Isabela Luísa e Lidiele pela amizade, apoio, confiança e momentos vividos todos esses anos.

Ao meu namorado e amigo Ronald pela paciência e companheirismo durante esses anos.

Por fim agradeço ao corpo docente e corpo técnico da Engenharia Ambiental Ufes por toda dedicação aos alunos e aos ensinamentos de qualidade passados durante a graduação.

RESUMO

Com base em diversos estudos, comprova-se os efeitos da poluição atmosférica na saúde humana. Posto isso, se faz necessário a criação de instrumentos legais que garantam o direito a população de respirar um ar saudável. A utilização de modelos de qualidades do ar se torna interessante para atendimentos desses instrumentos legais, visto que, eles são capazes de simular a dispersão dos poluentes e apresentar a concentração que a população está exposta. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é estudar a qualidade do ar do município de Serra (ES), a partir da modelagem computacional da dispersão de poluentes. Propõe-se então modelar a dispersão dos poluentes MP_{10} , $MP_{2,5}$, CO, NO_x e SO_2 e comparar os resultados simulados com os padrões de qualidade dispostos na Resolução CONAMA N° 491/2018, DECRETO N° 3463-R/2013 e diretrizes da Organização Mundial da Saúde. Para isto, foram propostos 12 pontos de estudo, utilizou-se o modelo CALPUFF e os dados do Inventário de Emissões Atmosférica da Região da Grande Vitória de 2015. Para validação da dos resultados simulados, comparou-se por meio de índices estatísticos com os valores medidos nas estações de monitoramento localizadas na Serra. Foi constatado que o modelo apresentou melhor desempenho na simulação de MP_{10} . Além disso, nota-se uma superestimação dos resultados de NO_x e SO_2 e uma subestimação para o CO. Com base nos padrões de qualidade do ar, nota-se um maior número de ultrapassagens dos padrões nas estações de qualidade do ar. Entretanto, na maioria dos pontos considerados neste estudo não foram observadas violações dos limites para nenhum dos poluentes simulados.

Palavras-chaves: Qualidade do ar; Dispersão Atmosférica; CALPUFF; Modelagem Computacional

ABSTRACT

Based on several studies, there is evidence of the effects of air pollution on human health. Therefore, it is necessary to create legal instruments that guarantee the right of the population to breathe healthy air. The use of air quality models is interesting for the fulfillment of these legal instruments, since they are able to simulate the dispersion of pollutants and present the concentration to which the population is exposed. Thus, the objective of this work is to study the air quality of the municipality of Serra (ES), from the computational modeling of the dispersion of pollutants. It is proposed to model the dispersion of pollutants MP_{10} , $MP_{2.5}$, CO, NO_x and SO_2 and compare the simulated results with the quality standards set forth in Resolução CONAMA N° 491/2018, DECRETO N° 3463-R/2013 and guidelines of the World Health Organization. For this, 12 study points were proposed, the CALPUFF model and data from the “Inventário de Emissões Atmosférica da Região da Grande Vitória de 2015” were used. To validate the simulated results, they were compared through statistical indices with the values measured at the monitoring stations located in Serra. It was found that the model showed better performance in the simulation of MP_{10} . Furthermore, an overestimation of NO_x and SO_2 results and an underestimation for CO can be noted. Based on the air quality standards, a higher number of exceedances of the standards at the air quality stations is noted. However, at most of the points considered in this study, no violations of the limits were observed for any of the simulated pollutants.

Keywords: Air Quality; Atmospheric Dispersion; CALPUFF; Computational Modeling

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Padrões de qualidade do ar dispostos pela Resolução Conama n° 491/2018.	22
Tabela 3.2 : Padrões de qualidade do ar dispostos pelo Decreto Estadual n° 3463-R de 2013.....	23
Tabela 3.3 :Padrões de qualidade do ar dispostos pelo Guia de qualidade do ar da OMS.	24
Tabela 5.1: Descrição dos pontos receptores discretos definidos.....	46
Tabela 6.1: Resultados obtidos para os índices estatístico calculados.....	61
Tabela 6.2: Média anual das concentrações simuladas de MP ₁₀	70
Tabela 6.3: Média anual das concentrações simuladas de MP _{2,5}	75
Tabela 6.4: Média anual das concentrações simuladas de SO ₂	91
Tabela 6.5: Média anual das concentrações simuladas de NO _x	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Dados cartográficos do município da Serra.	28
Figura 4.2: Modelo digital de terreno do município da Serra.	30
Figura 4.3 : Uso e cobertura da terra do Município da Serra.	32
Figura 4.4: Velocidade média, máxima e mínima durante os meses de 2021. .	33
Figura 4.5: Rosa dos ventos para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.	34
Figura 4.6: Rosas dos ventos de janeiro, fevereiro e março para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.	35
Figura 4.7: Rosas dos ventos de abril, maio e junho para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.	36
Figura 4.8: Rosas dos ventos de julho, agosto e setembro para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.	37
Figura 4.9: Rosas dos ventos de outubro, novembro e dezembro para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.	38
Figura 4.10: Temperatura do ar média, máxima e mínima durante os meses de 2021.	39
Figura 4.11: Radiação solar média e máxima durante os meses de 2021.	40
Figura 4.12: Umidade relativa média, máxima e mínima durante os meses de 2019.	41
Figura 4.13: Pressão atmosférica média, máxima e mínima durante os meses de 2021.	42
Figura 4.14: Precipitação acumulada durante os meses de 2021.	43
Figura 4.15: Localização das estações de monitoramento de qualidade do ar na Serra.	44
Figura 5.1: Domínio computacional de estudo.	45
Figura 5.2: Pontos receptores discretos definidos para análise.	46
Figura 5.3: Fontes modeladas.	47
Figura 5.4: Evolução de um puff emitido por uma fonte pontual.	50
Figura 6.1: Médias diárias de NO _x medidas e simuladas na Estação Laranjeiras.	57
Figura 6.2: Médias diárias de CO medidas e simuladas na Estação Laranjeiras.	58
Figura 6.3: Médias diárias de NO _x medidas e simuladas na Estação Cidade Continental.	58
Figura 6.4: Médias diárias de SO ₂ medidas e simuladas na Estação Cidade Continental.	59
Figura 6.5: Médias diárias de MP ₁₀ medidas e simuladas na Estação Carapina.	59
Figura 6.6: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Estação Laranjeiras.	65
Figura 6.7: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Estação Cidade Continental.	65
Figura 6.8: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Estação Carapina. ...	65
Figura 6.9: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Centro Serra.	66
Figura 6.10: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Jacaraípe.	66

Figura 6.11: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Nova Almeida.	66
Figura 6.12: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Feu Rosa.....	67
Figura 6.13: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Barcelona	67
Figura 6.14: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Nova Carapina.....	67
Figura 6.15: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Jardim Tropical.....	68
Figura 6.16: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Planalto Serra.....	68
Figura 6.17: Evolução das Médias de 24 horas de MP ₁₀ – Serra Dourada.....	68
Figura 6.18: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Estação Laranjeiras.	71
Figura 6.19: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Estação Cidade Continental.	71
Figura 6.20: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Estação Carapina.	71
Figura 6.21: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Centro Serra.....	72
Figura 6.22: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Jacaraípe.	72
Figura 6.23: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Nova Almeida.....	72
Figura 6.24: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Feu Rosa.....	73
Figura 6.25: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Barcelona.	73
Figura 6.26: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Nova Carapina.	73
Figura 6.27: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Jardim Tropical.....	74
Figura 6.28: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Planalto Serrano. .	74
Figura 6.29: Evolução das Médias de 24 horas de MP _{2,5} – Serra Dourada.....	74
Figura 6.30: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Estação Laranjeiras... ..	77
Figura 6.31: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Estação Cidade Continental.	77
Figura 6.32: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Estação Carapina.....	77
Figura 6.33: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Centro Serra.....	78
Figura 6.34: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Jacaraípe.....	78
Figura 6.35: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Nova Almeida.	78
Figura 6.36: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Feu Rosa.....	79
Figura 6.37: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Barcelona.	79
Figura 6.38: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Nova Carapina.....	79
Figura 6.39: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Jardim Tropical.	80
Figura 6.40: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Planalto Serrano.....	80
Figura 6.41: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Serra Dourada.....	80
Figura 6.42: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Estação Laranjeiras.	81
Figura 6.43: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Estação Cidade Continental.	81
Figura 6.44: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Estação Carapina. ...	81
Figura 6.45: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Centro Serra.	82
Figura 6.46: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Jacaraípe.....	82
Figura 6.47: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Nova Almeida.	82
Figura 6.48: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Feu Rosa.....	83
Figura 6.49: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Barcelona.	83
Figura 6.50: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Nova Carapina.....	83
Figura 6.51: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Jardim Tropical.....	84
Figura 6.52: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Planalto Serrano.....	84
Figura 6.53: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Serra Dourada.	84

Figura 6.54: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Estação Laranjeiras.	87
Figura 6.55: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Estação Cidade Continental.	87
Figura 6.56: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Estação Carapina.	87
Figura 6.57: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Centro Serra.	88
Figura 6.58: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Jacaraípe.	88
Figura 6.59: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Nova Almeida.	88
Figura 6.60: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Feu Rosa.	89
Figura 6.61: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Barcelona.	89
Figura 6.62: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Nova Carapina.	89
Figura 6.63: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Jardim Tropical.	90
Figura 6.64: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Planalto Serrano.	90
Figura 6.65: Evolução das Médias de 24 horas de SO ₂ – Serra Dourada.	90
Figura 6.66: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Estação Laranjeiras.	93
Figura 6.67: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Estação Cidade Continental.	93
Figura 6.68: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Estação Carapina.	93
Figura 6.69: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Centro Serra.	94
Figura 6.70: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Jacaraípe.	94
Figura 6.71: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Nova Almeida.	94
Figura 6.72: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Feu Rosa.	95
Figura 6.73: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Barcelona.	95
Figura 6.74: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Nova Carapina.	95
Figura 6.75: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Jardim Tropical.	96
Figura 6.76: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Planalto Serrano.	96
Figura 6.77: Evolução das Médias de 1 hora de NO _x – Serra Dourada.	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1: Parâmetros monitorados e descrição da área de influência de cada estação.....	44
Quadro 5.1: Parâmetros necessários para modelagem de cada tipo de fonte.	48
Quadro 5.2: Observações meteorológicas do CALMET.....	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. POLUIÇÃO DO AR.....	16
3.2. POLUENTES E SEUS EFEITOS NA SAÚDE	17
3.2.1. Material Particulado.....	17
3.2.2. Monóxido de Carbono	18
3.2.3. Dióxido de Enxofre	18
3.2.4. Óxido de Nitrogênio	18
3.3. REGULAMENTAÇÃO APLICÁVEL A QUALIDADE DO AR.....	20
3.4. PADRÕES DA QUALIDADE DO AR.....	21
3.5. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA.....	25
3.5.1. Influência da Direção e Velocidade do Vento.....	25
3.5.2. Influência da Estabilidade Atmosférica	26
3.5.3. Influência do Terreno	27
4. METODOLOGIA.....	28
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
4.1.1. Caracterização Topográfica.....	29
4.1.2. Uso e Ocupação do solo.....	31
4.2. CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS.....	33
4.2.1. Velocidade do Vento e Direção do Vento	33
4.2.2. Temperatura do Ar.....	39
4.2.3. Radiação Solar	40
4.2.4. Umidade Relativa.....	41
4.2.5. Pressão Atmosférica	42
4.2.6. Precipitação	43
4.3. ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR	44
4.4. DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL E MALHA DE RECEPTORES	45
4.5. MODELAGEM DAS FONTES	47
4.6. SISTEMA DE MODELAGEM CALPUFF	49
4.6.1. CALMET.....	51

4.6.2.	CALPUFF	52
4.6.3.	CALPOST	53
4.7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	54
4.7.1.	Análise Estatística	54
4.7.2.	Análise da Qualidade do Ar	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	57
5.2.	ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR.....	64
5.2.1.	Material Particulado Inferior a 10 μm (MP_{10}).....	64
5.2.2.	Material Particulado Inferior a 2,5 μm ($\text{MP}_{2,5}$).....	70
5.2.3.	Monóxido de Carbono	76
5.2.4.	Dióxido de Enxofre	86
5.2.5.	Óxidos de Nitrogênio	92
6.	CONCLUSÕES	98
7.	REFERÊNCIAS	100

1. INTRODUÇÃO

Vários estudos comprovam a relação entre a poluição atmosférica e os efeitos que causam à saúde humana. Além disso, o direito de respirar um ar sadio é um direito à saúde, garantidos a todos, pela Constituição Federal (SILVA, 1997).

A poluição atmosférica pode ser definida como a introdução de qualquer forma de matéria ou energia responsável pela degradação da qualidade do ar em concentrações nocivas ou ofensivas à saúde humana, passíveis de danos aos recursos naturais interferindo no legítimo uso do meio ambiente (WHO, 2006).

Segundo Braga et. al. (2001), a poluição atmosférica desde a primeira metade do século XX tem sido um grave problema nos centros urbanos industrializados, devido à presença cada vez maior dos automóveis e as indústrias, como fontes poluidoras.

Diante dessa problemática ambiental se faz necessário a criação de instrumentos legais para assegurar o direito de ambiente ecologicamente equilibrado a todos cidadãos (BIASUTTI e GOMES, 2012). Um dos instrumentos utilizados são os estudos de impacto ambiental anteriores à instalação de grandes empreendimentos em uma região. Nesses estudos utiliza-se dados de monitoramento e os Modelos de Qualidade do Ar (MQAr) (SOARES, 2010).

Segundo Gomes (2010), a utilização de modelos computacionais confere um método bastante difundido, logo preferido para múltiplas aplicações, devido a facilidade e comodidade de seu uso. Além disso, também são recomendados por diversas agências de controle ambiental, dentre elas a Agência Norte-Americana de Proteção Ambiental (EPA). Os MQAr são capazes de simular a dispersão dos poluentes provenientes de indústrias e outras fontes e assim apresentar a concentração que a população do entorno está exposta.

No município da Serra, a utilização de modelos de qualidade do ar se torna interessante devido à presença de diversas fontes de emissão, incluso parte do Complexo Industrial de Tubarão, que segundo o IEMA (2018), é responsável por mais de 80% das emissões de poluentes primários na Região Metropolitana da Grande Vitória. Além disso, este complexo e outras fontes encontram-se muito próximo da população urbana, podendo degradar a qualidade do ar do entorno.

Os resultados obtidos pelos modelos de qualidade do ar são comparados aos níveis de qualidade do ar exigidos pelas legislações ambientais nacionais e estaduais (NEDEL, 2003).

No Brasil, os padrões de qualidade do ar são dispostos pela Resolução Conama nº 491/2018 onde são legislados os seguintes poluentes: Material Particulado (MP_{10}), Material Particulado ($MP_{2,5}$), Dióxido de Enxofre (SO_2), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Ozônio (O_3), Fumaça, Monóxido de Carbono (NO), Partículas Totais em Suspensão (PTS) e Chumbo (Pb_5). No Espírito Santo, os padrões são dispostos pelo Decreto Estadual nº 3463-R de 2013, sendo esses padrões mais restritivos, além de incluir outros poluentes não preconizados pela legislação nacional como a Poeira Sedimentável (PS).

Sendo assim, o presente projeto pretende estudar a qualidade do ar no município da Serra verificando por meio de modelagem da dispersão dos poluentes MP_{10} , $MP_{2,5}$, NO_x , SO_2 e CO. Além disso, busca-se realizar a comparação dos resultados obtidos com os padrões de qualidade do ar dispostos pela Resolução CONAMA Nº 491/2018, DECRETO Nº 3463-R/2013 e Diretrizes da Organização Mundial da Saúde.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é estudar a qualidade do ar do município de Serra (ES), a partir da modelagem computacional da dispersão de poluentes.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar a dispersão dos poluentes MP_{10} , $MP_{2,5}$, NO_x , SO_2 e CO no município de Serra (ES) por meio do modelo CALPUFF.
- Avaliar a qualidade do ar na região comparando com os padrões de qualidade do ar segundo a Resolução CONAMA n° 491/2018, Decreto Estadual n° 3463-R de 2013 e Diretrizes da Organização Mundial da Saúde.
- Comparar estaticamente os valores de concentração modelados no CALPUFF com os valores medidos nas estações de monitoramento de qualidade do ar da Serra durante o ano de 2021.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. POLUIÇÃO DO AR

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2022), a poluição atmosférica pode ser definida como:

(...) qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e à qualidade de vida da comunidade.

Além dos prejuízos a saúde e qualidade de vida das pessoas, a poluição atmosférica acarreta maiores gastos para os estados devido ao aumento do número de atendimentos e internações hospitalares, custos que poderiam ser evitados com a melhoria da qualidade do ar dos centros urbanos (MMA, 2022).

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2022), o nível de poluição atmosférica é medido pela quantidade de substâncias poluentes presentes no ar. Essas substâncias podem ser classificadas como: poluentes primários e poluentes secundários.

Sendo os poluentes primários aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão e os secundários aqueles formados na atmosfera através da reação química entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera (CETESB, 2022).

Dentre esses poluentes, pode-se destacar o material particulado, o dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono onde a exposição aos mesmos pode causar problemas respiratórios como asma, bronquite e outros.

3.2. POLUENTES E SEUS EFEITOS NA SAÚDE

3.2.1. Material Particulado

De acordo com a CETESB (2022), as principais fontes emissoras de material particulado são a queima de combustíveis fósseis, queima de biomassa vegetal, veículos automotores, processos industriais, ressuspensão de poeira do solo, entre outros.

Seinfeld e Pandis (2006), definem material particulado da seguinte forma:

(...) o material particulado é qualquer partícula no estado líquido ou sólido (ou a mistura destas fases) em suspensão no ar. Estão presentes na atmosfera na forma de poeira, névoas, fumos e fumaça. O MP é um dos mais importantes parâmetros em estudo de poluição atmosférica devido aos diversos impactos que ele causa à saúde humana e ao meio ambiente.

O tamanho da partícula está associado diretamente ao seu potencial para causar problemas à saúde, sendo que quanto menores maiores os efeitos provocados (CETESB, 2022).

De acordo com IEMA (2020), para as partículas mais finas os efeitos estão predominantemente relacionados aos sistemas respiratórios e cardiovasculares. Já as partículas mais grossas as reações mais comuns dizem respeito à impossibilidade de gozo pleno da propriedade e causam desconforto devido a deposição desse material sob as superfícies de uso cotidiano (IEMA, 2020).

Sendo assim, o material particulado pode ser classificado como: Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis (MP₁₀) e Partículas Inaláveis Finas (MP_{2,5}).

Os PTS, são aquelas partículas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 50 µm. Já os MP₁₀, podem ser definidos de forma simplificada como partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 µm. Essas partículas podem penetrar o sistema respiratório, mas tendem a ficar retidas no nariz e nasofaringe (IEMA, 2022.). Por fim, o MP_{2,5} são definidos como partículas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 2.5 µm e segundo o IEMA (2022), tendem a penetrar mais profundamente no sistema respiratório, podendo chegar até os bronquíolos terminais.

3.2.2. Monóxido de Carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor e inodoro que resulta da combustão incompleta de combustíveis de origem orgânica como combustíveis fósseis, biomassa etc. (CETESB, 2022).

De acordo com o IEMA (2022), o CO combina-se com a hemoglobina rapidamente ocupando o lugar do oxigênio podendo levar a morte de um indivíduo por asfixia. Além disso, a exposição crônica deste poluente pode causar prejuízos ao sistema nervoso central, cardiovascular, pulmonar e outros.

3.2.3. Dióxido de Enxofre

Segundo Braga et al (2001), o dióxido de enxofre resulta da combustão de elementos fósseis, como carvão e petróleo. Sendo assim, suas principais fontes são: processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, polpa e papel (IEMA, 2022).

A maior parte do dióxido de enxofre inalado por uma pessoa em repouso é absorvida nas vias aéreas superiores. A atividade física leva a um aumento da ventilação alveolar e conseqüentemente aumento da sua absorção pelas regiões mais distais do pulmão (CANÇADO et al, 2006).

Ainda segundo o IEMA (2022), a inalação do poluente provoca espasmos passageiros dos músculos lisos dos bronquíolos pulmonares mesmo em concentrações muito baixas. Já em concentrações maiores os efeitos a saúde podem ser o aumento da secreção mucosa nas vias respiratórias superiores, graves inflamações da mucosa e podem ainda aumentar a incidência em doenças como bronquite, rinite e faringite.

3.2.4. Óxido de Nitrogênio

Segundo Castro et. al. (2013) os óxidos de nitrogênio são compostos poluentes gasosos comuns e tóxicos que afetam a saúde de milhões de seres humanos, especialmente em áreas urbanas.

Assim como SO₂, o NO_x também é formado durante processos de combustão. De acordo com a CETESB (2022), nas grandes cidades os veículos são as principais fontes de emissão de NO_x, além de indústrias e usinas térmicas que utilizam óleo ou gás e incineradores. Quando inalado, atinge as porções mais

periféricas do pulmão devido à sua baixa solubilidade em água (CANÇADO et al, 2006).

O NO_x é altamente tóxico a saúde humana, porque aumenta a susceptibilidade aos problemas respiratórios em geral. Além disso, é irritante às mucosas e pode nos pulmões ser transformado em nitrosaminas (algumas das quais são carcinogênicas) (IEMA, 2022)

3.3. REGULAMENTAÇÃO APLICÁVEL A QUALIDADE DO AR

Na esfera internacional, a Organização Mundial da Saúde (OMS) representa o organismo diretor e coordenador nos assuntos relacionados à saúde. Sendo assim, o objetivo da OMS é promover a agenda da pesquisa científica na área da saúde, diagnosticar as tendências mundiais e auxiliar o estabelecimento de normas e diretrizes, entre outros (IEMA, 2020).

Em 1987, a OMS publicou o primeiro volume das diretrizes de qualidade do ar, onde foi formulada diretrizes para 28 poluentes atmosféricos sobre exposição em ambientes externos e internos (OMS, 2021). Foi publicada uma atualização global em 2005, que forneceu valores numéricos de orientação para material particulado, ozônio, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre, com base em uma revisão abrangente de todas as evidências disponíveis naquele período. Segundo a OMS (2021), com o aumento nas evidências sobre os efeitos da poluição do ar à saúde humana, com base nos avanços na medição da poluição do ar e na avaliação da exposição e um banco de dados global expandido de medidas de poluição do ar, em 2021 a organização publicou a atualização das diretrizes da qualidade do ar.

Em âmbito nacional, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 491/2018 publicada em novembro de 2018. Esta resolução está estruturada considerando como referência as diretrizes da OMS.

Já em nível Estadual, o Governo do Estado do Espírito Santo estabeleceu os padrões estaduais de qualidade do ar, por meio do Decreto n° 3.463-R de 16/12/2013. O decreto estabeleceu padrões mais restritivos quando comparados com a resolução nacional, além de incluir poluentes não preconizados na CONAMA n°491/2018.

3.4. PADRÕES DA QUALIDADE DO AR

A partir de conhecimento científico e das informações sobre o comportamento dos fatores ambientais e suas interações, critérios de qualidade ambiental podem ser estabelecidos, estes critérios servem de referência para as ações de gestão ambiental (CALVACANTI, 2010).

Sob um aspecto legal, um dos níveis de referências utilizados para determinar a qualidade ambiental em relação ao ar são os padrões de qualidade do ar. Sendo um padrão de qualidade do ar definido como um dos instrumentos de gestão da qualidade do ar que determina um valor máximo de concentração de poluente específico na atmosfera, para preservação do meio ambiente e a saúde da população em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica (BRASIL, 2018).

Os padrões de qualidade do ar podem ser divididos em primários e secundários. Sendo os padrões primários aqueles que quando as concentrações ultrapassadas poderão afetar a saúde da população, se baseando na parcela de indivíduos mais sensíveis aos mesmos, como crianças, idosos e pessoas com problemas respiratórios crônicos (BRASIL, 1990). Já os padrões secundários, referem-se a níveis ambientais seguros, ou seja, concentrações de poluentes abaixo das quais se espera o mínimo de impacto adverso sobre o bem-estar da população, flora, fauna, vida animal e meio ambiente em geral (BRASIL, 1990).

No Brasil, os padrões de qualidade são estabelecidos pela Resolução CONAMA 491/2018. Esses padrões são apresentados na **Tabela 3.1**.

Tabela 3.1: Padrões de qualidade do ar dispostos pela Resolução Conama n° 491/2018.

Poluente atmosférico	Período de Referência	Padrão de qualidade (mg/m ³)
PTS	24 horas	240
	Anual	80
MP ₁₀	24 horas	120
	Anual	40
MP _{2,5}	24 horas	60
	Anual	20
SO ₂	24 horas	125
	Anual	40
NO ₂	1 hora	260
	Anual	60
O ₃	8 horas	140
Fumaça	24 horas	120
	Anual	40
CO	8 horas	10.000
Pb ₅	Anual	0,5

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2018.

No Espírito Santo o Decreto Estadual N° 3463-R de 2013 estabeleceu padrões mais restritivos do que os padrões dispostos na legislação nacional. Sendo assim, o Espírito Santo é um dos estados com maiores restrições quanto os padrões de qualidade do ar (IEMA, 2021). Os padrões são expostos na tabela a seguir (**Tabela 3.2**).

Tabela 3.2 : Padrões de qualidade do ar dispostos pelo Decreto Estadual n° 3463-R de 2013.

Poluente atmosférico	Período de Referência	Padrão de qualidade (mg/m ³)
PTS	24 horas	180
	Anual	65
MP ₁₀	24 horas	120
	Anual	45
MP _{2,5}	24 horas	50
	Anual	20
SO ₂	24 horas	60
	Anual	40
NO ₂	1 hora	240
	Anual	50
O ₃	8 horas	140
CO	24 horas	10.000
	1 hora	30.000
PS	30 dias	14 ¹

Fonte: Adaptado de GOVERNO DO ESTADO ESPÍRITO SANTO, 2013.

Nota:¹unidade de medida em g/m²

Em 2021 a OMS publicou novas diretrizes para a qualidade do ar (**Tabela 3.3**) com objetivo de oferecer recomendações quantitativas baseadas em saúde para a qualidade do ar, expressas como concentração de longo ou curto prazo de vários poluentes atmosféricos importantes.

Tabela 3.3 :Padrões de qualidade do ar dispostos pelo Guia de qualidade do ar da OMS.

Poluente atmosférico	Período de Referência	Padrão de qualidade (mg/m³)
MP ₁₀	24 horas	45
	Anual	15
MP _{2,5}	24 horas	15
	Anual	5
SO ₂	24 horas	40
NO ₂	1 hora	200
	24 horas	25
	Anual	10
O ₃	8 horas	100
CO	24 horas	4.000

Fonte: Adaptado de OMS, 2021.

3.5. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

A concentração de poluentes no ar é o resultado de processos complexos, sujeitos a vários fatores que compreendem não só a emissão pelas fontes, mas também suas interações físicas (diluição) e químicas (reações) na atmosfera (SZWARCFITER, 2004). A concentração dos poluentes no ar depende tanto dos mecanismos de dispersão como de sua produção e remoção.

Segundo Calvacanti (2010), normalmente a própria atmosfera é capaz de dispersar os poluentes, misturando-os com eficiência, a um grande volume de ar, o que contribui para que a poluição fique em níveis aceitáveis.

E os principais fatores meteorológicos que influenciam a dispersão atmosférica são: vento (direção e velocidade), estabilidade atmosférica, intensidade da inversão de altitude, movimentos verticais devido aos sistemas de alta/baixa pressão além disso o terreno da região também grande influência neste processo (ZANNETTI, 1990).

3.5.1. Influência da Direção e Velocidade do Vento

A direção e velocidade dos ventos propiciam o transporte e a dispersão de poluentes atmosféricos, identificando sua trajetória e alcances possíveis (VICENTINE, 2011).

Segundo Moraes (2004), a direção inicial do transporte dos poluentes originados de uma fonte é determinada pela direção do vento medido no local da fonte, além disso a concentração de poluentes originados de fontes pontuais, é provavelmente mais sensível a direção do vento do que qualquer outro fator.

O autor Godish (2004) cita que as áreas localizadas a favor do vento advindos de fontes pontuais (onde os ventos são relativamente persistentes), podem apresentar concentrações relativamente altas no nível do solo em comparação com outras áreas com distâncias semelhantes. Porém, se o vento for mais variável, os poluentes irão se dispersar em um volume maior de ar e serão distribuídos de forma mais igualitária ao redor da fonte, assim as concentrações ao nível do solo são, serão provavelmente menores.

Quanto a velocidade do vento, vale ressaltar que ela influencia significativamente na diluição de poluentes atmosféricos visto que em situações de calmaria, onde

ocorre a estagnação do ar, pode ser propiciado um aumento na concentração de poluentes. Já a ocorrência de episódios de altas concentrações em momentos de incidência de ventos mais intensos não é comum, ou seja, concentrações maiores ocorrem quando e onde os ventos incidentes são mais fracos ou inexistentes (YNOUE et al., 2017).

3.5.2. Influência da Estabilidade Atmosférica

A estabilidade atmosférica é o parâmetro meteorológico utilizado para definir as condições de dispersão de uma área (CALVACANTI, 2010). De acordo com Moraes (2004), também pode ser definida como a capacidade de resistir ou intensificar os movimentos verticais.

Ainda segundo o autor Moraes (2004), quando ela resiste a estes movimentos é chamada de atmosfera estável, quando os intensifica é dita atmosfera instável ou convectiva, e quando é indiferente a qualquer tipo de movimento vertical é chamada atmosfera neutra. Além disso, cada tipo de estabilidade irá proporcionar uma melhor ou pior dispersão dos poluentes.

Segundo Sorbjan (2003), a estrutura da camada limite atmosférica é bastante complexa para não meteorologistas. Sendo assim, foi proposta por Pasquill em 1961, uma proposta simplificada para classificação das condições meteorológicas na camada limite baseada em 6 categorias de estabilidade:

A – extremamente instável

B - instável

C – levemente instável

D - neutra

E - estável

F – extremamente estável

As condições para a ocorrência de instabilidade são alta radiação solar e ventos de baixa velocidade, estas condições proporcionam uma forte mistura vertical de poluentes provocadas por movimentos convectivos organizados gerados pelo aquecimento solar da superfície (CARVALHO, 1999). As condições de estabilidade ocorrem na ausência de radiação solar, ausência de nuvens e

ventos leves, as condições de estabilidade atmosférica tendem a ser desfavorável a dispersão de poluentes. Céu nublado ou ventos fortes caracterizam a condição neutra da atmosfera (CAVALCANTI, 2010).

3.5.3. Influência do Terreno

Os movimentos do ar da micro e mesoescala são afetados pelas características topográficas do terreno. Sendo assim, a complexidade de um terreno pode ter efeitos significativos tanto no movimento do ar quanto nos níveis de poluentes presentes na atmosfera (GODISH, 2004).

Os terrenos planos não possuem nenhum tipo de elevação na vertical, ou possuem elevações que não influenciam significativamente o escoamento ao seu redor. Já os terrenos complexos são aqueles que apresentam elevações verticais tão significativas que são capazes de influenciar o escoamento ao seu redor, gerando recirculações (GOMES e BIASUTTI, 2012).

De acordo com Carvalho (1999), o encontro de pluma com montanhas, acúmulo de poluentes em vales, arrasto de poluentes para centros urbanos são as principais situações que podem aumentar as concentrações em terrenos complexos.

4. METODOLOGIA

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município da Serra (**Figura 4.1.1**) pertence a Região Metropolitana da Grande Vitória e está situado a 27 quilômetros (km) da capital do estado, ocupando uma área de 547,631 km² com uma população estimada de 536.765 pessoas (IBGE, 2021). Faz divisa com o município de Fundão ao norte, Vitória ao sul, ao leste, o município é banhado pelo Oceano Atlântico e, ao oeste faz divisa com o município Santa Leopoldina.

Figura 4.1.1: Dados cartográficos do município da Serra.



Fonte: ABREU, 2006.

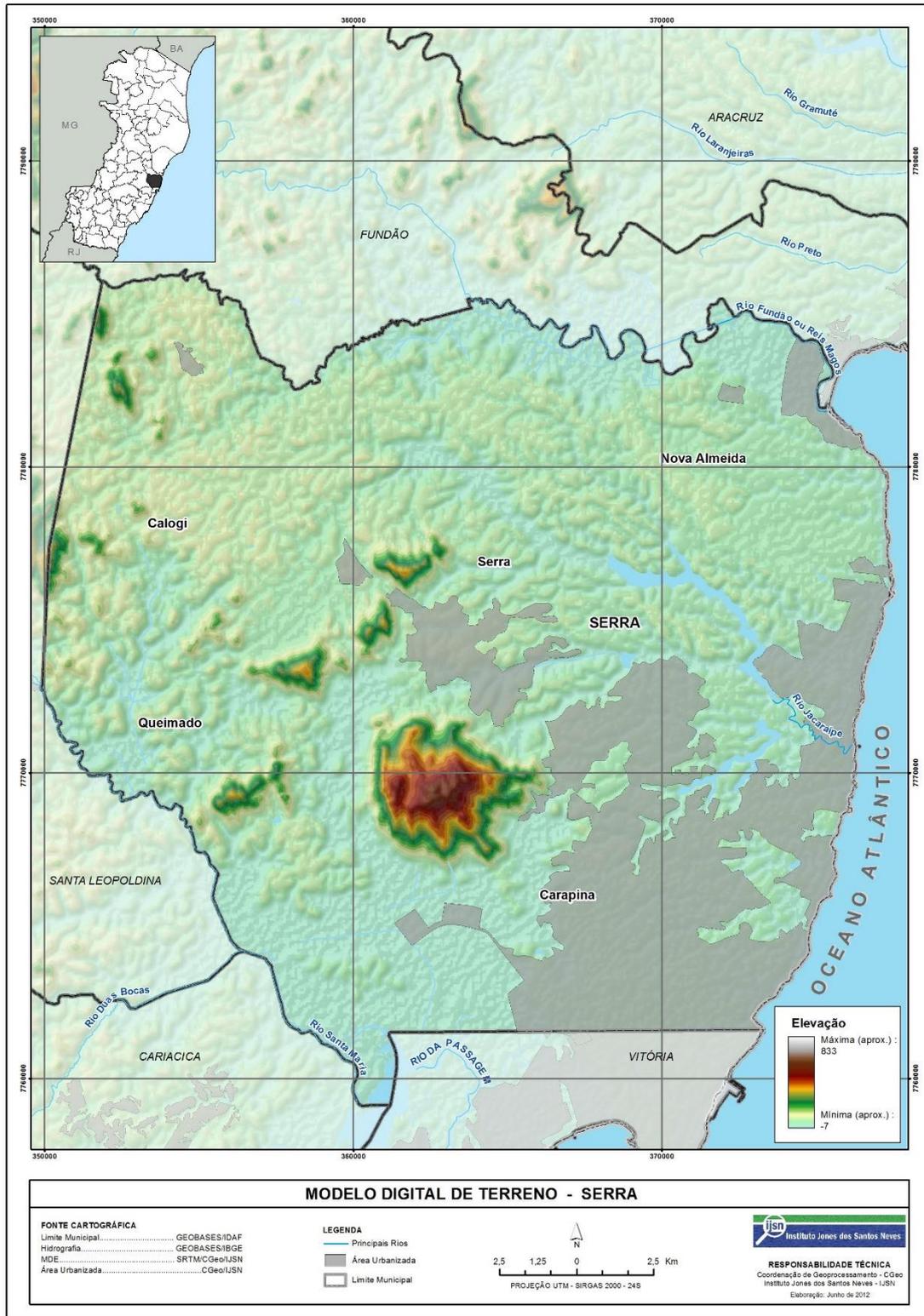
4.1.1. Caracterização Topográfica

O município da Serra está localizado a 70 metros de altitude e apresenta variação de altitude entre a máxima e a mínima de 490 metros (Mestre Álvaro) e de 0 metros (nível do mar), respectivamente.

O relevo da Serra apresenta uma diversidade de feições geomorfológicas decorrentes de sucessivas mudanças climáticas, das características litológicas e estruturais e dos fatores biológicos. Sendo assim, há a ocorrência do domínio dos depósitos sedimentares, com a Região das Planícies Costeiras e a Região dos Tabuleiros Costeiros, do Domínio de Faixas de Dobramentos Remobilizados representada pela Região das Colinas e Maciços Costeiros e pela Região da Mantiqueira Setentrional.

A figura (**Figura 4.1.2**) a seguir apresenta o modelo digital de terreno do município da Serra.

Figura 4.1.2: Modelo digital de terreno do município da Serra.

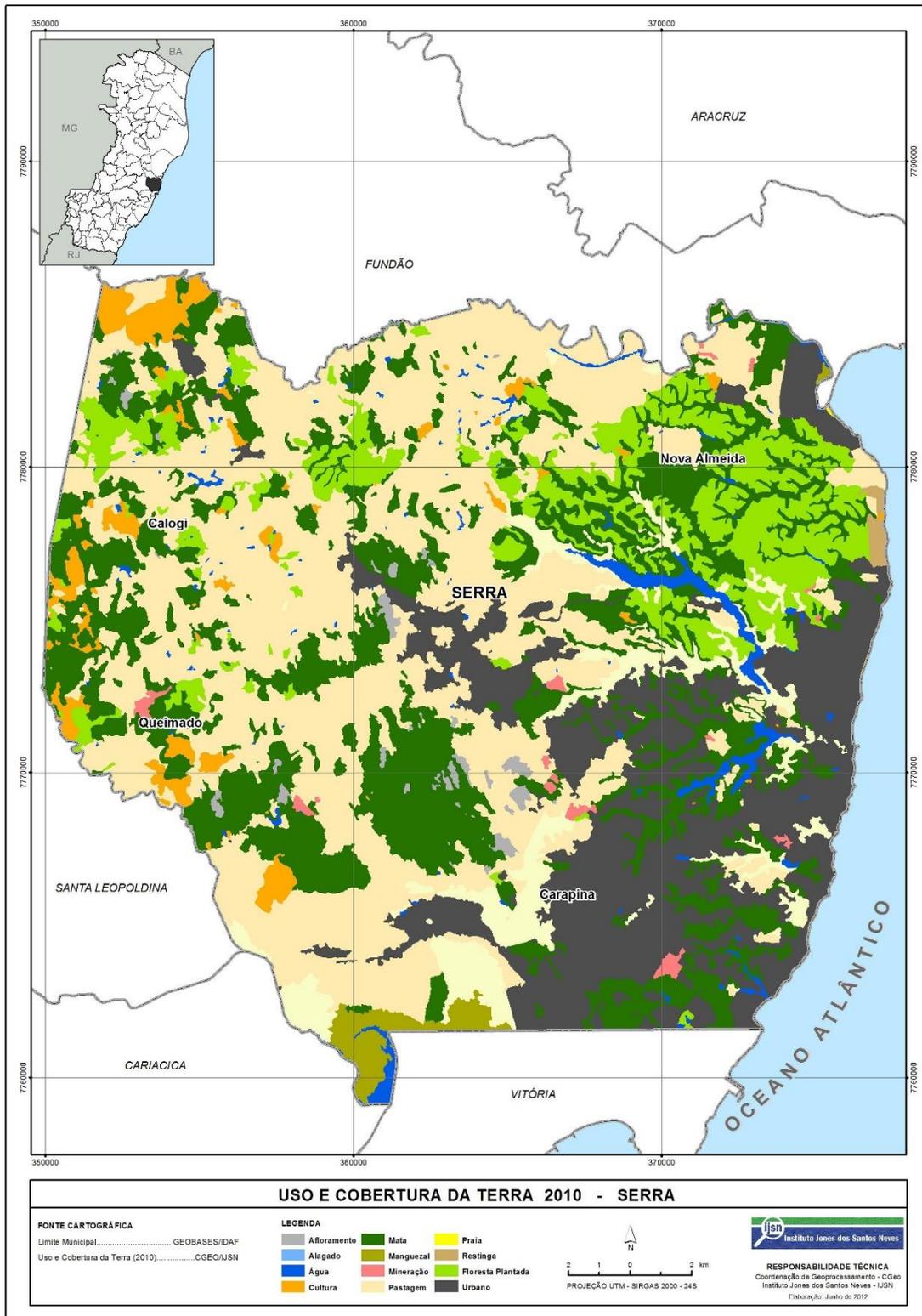


Fonte: IJSN, 2010.

4.1.2. Uso e Ocupação do solo

A figura a seguir (**Figura 4.1.3**), apresenta o mapa de uso e ocupação do solo no Município da Serra. É verificado que a maior parte do território possui cobertura de pastagem. E ao leste do município têm-se uma grande mancha urbana. Ainda é observado áreas expressivas de Floresta Plantada e Mata ao decorrer do município.

Figura 4.1.3 : Uso e cobertura da terra do Município da Serra.



Fonte: IJSN, 2010.

4.2. CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS

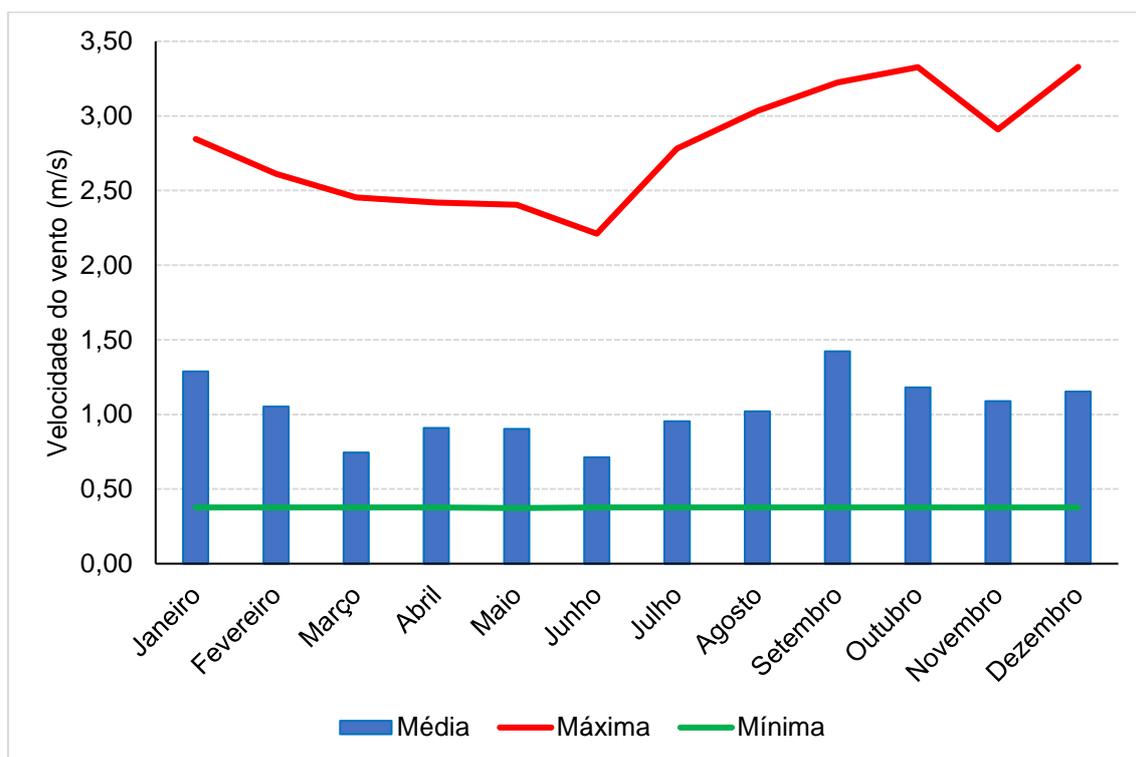
Neste capítulo são apresentadas as condições meteorológicas da região. Os dados de Direção e Velocidade do Vento, Temperatura do Ar, Radiação Solar, Umidade Relativa, Pressão Atmosférica e Precipitação utilizados para caracterização meteorológica são referentes as medições realizadas na Estação de Monitoramento da Qualidade do Ar (EMQAr) localizada no bairro Carapina do município da Serra.

4.2.1. Velocidade do Vento e Direção do Vento

4.2.1.1. Velocidade do Vento

A **Figura 4.1.4** apresenta a velocidade do vento média, máxima e mínima registrada na EMQAr Carapina ao longo do ano de 2021.

Figura 4.1.4: Velocidade média, máxima e mínima durante os meses de 2021.



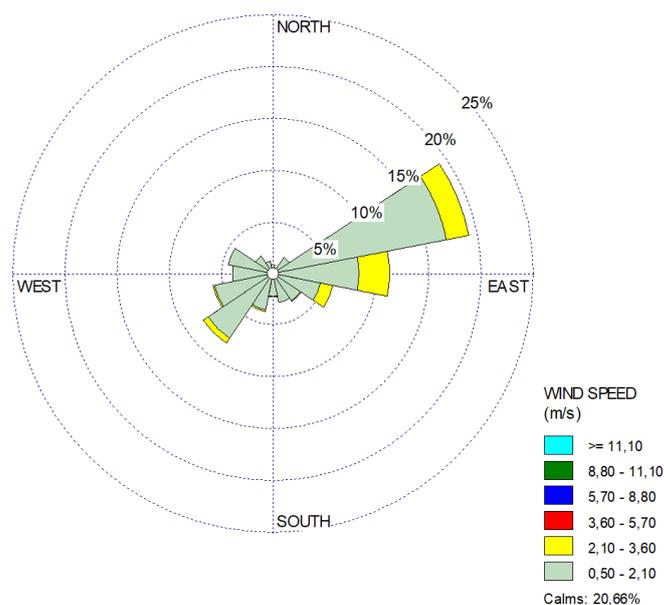
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Foi verificado que a velocidade média na estação de Carapina no ano de 2021 na estação de Carapina foi de 1,04 m/s, máxima de 3,33 m/s e mínima de 0,37 m/s.

4.2.1.2. Direção do Vento

Conforme apresentado na figura a seguir (**Figura 4.1.5**), a direção do vento mais frequente medida na estação em 2021 é a Les-nordeste, seguida da direção leste. Segundo IEMA (2020), o comportamento dos ventos nesta estação é influenciado pela presença de barreiras naturais e de construções que podem promover a atenuação de sua velocidade.

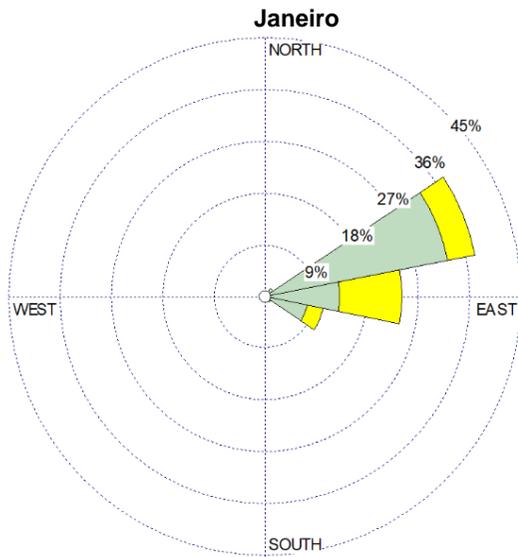
Figura 4.1.5: Rosa dos ventos para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.



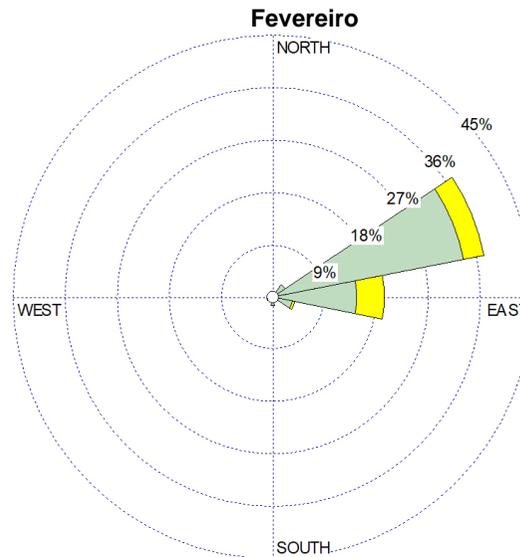
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A **Figura 4.1.6** a **Figura 4.1.9** apresentam as rosas para os meses de janeiro a dezembro de 2021 para a estação estudada. Analisando as rosas dos ventos pode-se verificar a forte influência dos ventos no quadrante nordeste (NE) em praticamente todos os meses do ano, sendo mais acentuado nos meses do Verão. Durante o período de abril a novembro é possível ver a influência de outros quadrantes, como por exemplo o quadrante sudoeste (SW).

Figura 4.1.6: Rosas dos ventos de janeiro, fevereiro e março para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.

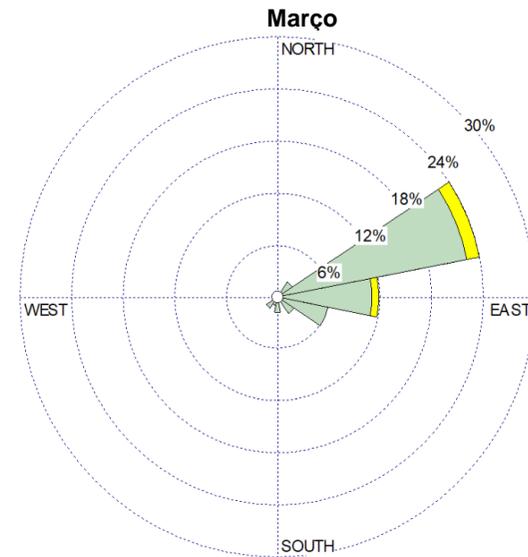


Calmaria:21,10%



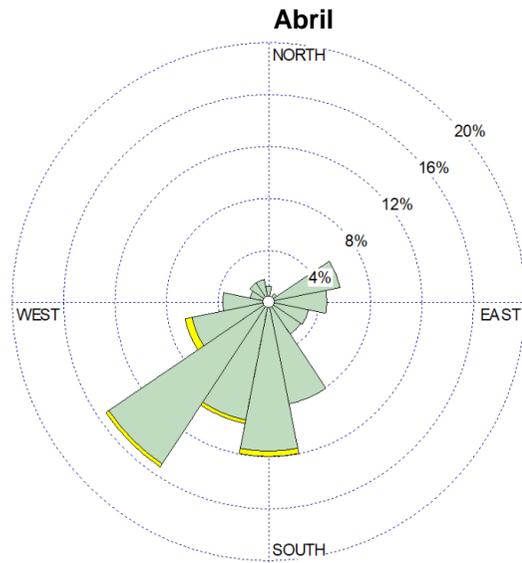
Calmaria:27,98%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

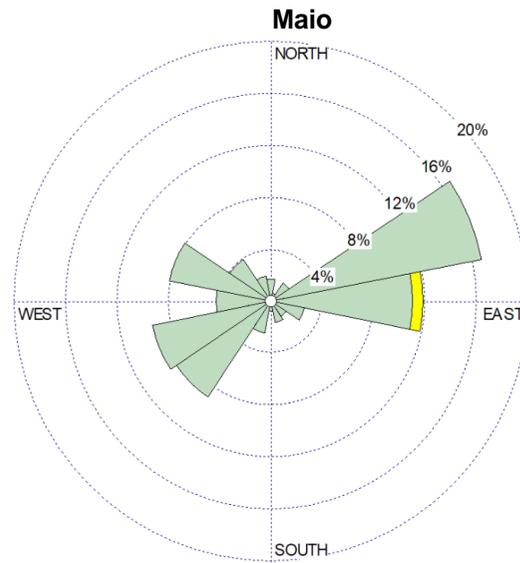


Calmaria:40,73%

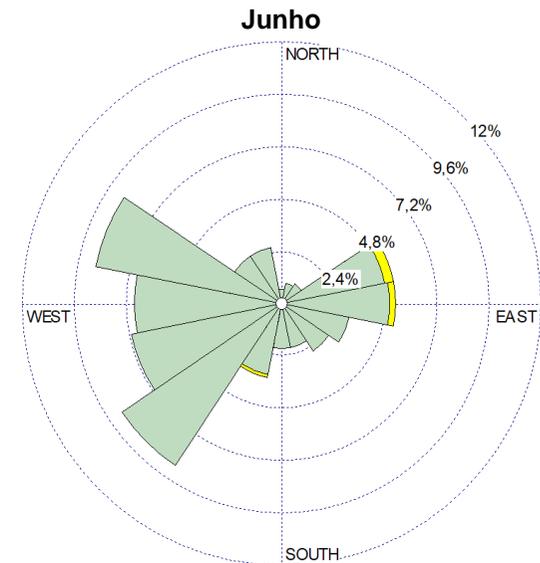
Figura 4.1.7: Rosas dos ventos de abril, maio e junho para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.



Calmaria:20,28%

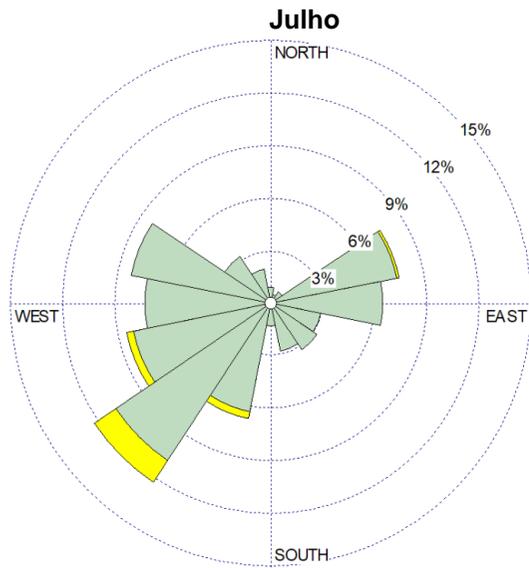


Calmaria:20,56%
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

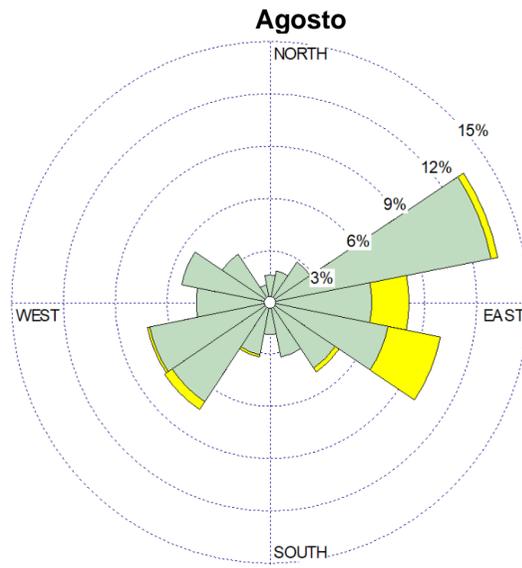


Calmaria:36,11%

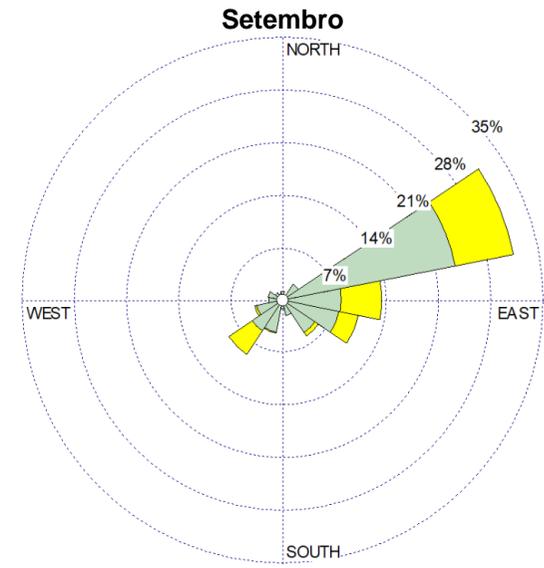
Figura 4.1.8: Rosas dos ventos de julho, agosto e setembro para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.



Calmaria:24,06%

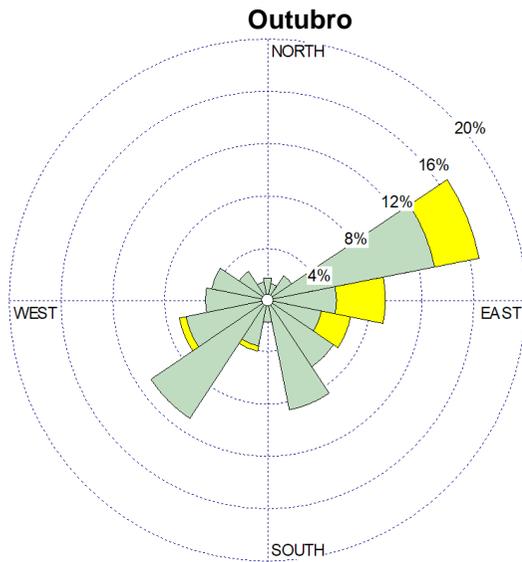


Calmaria:19,62%
 Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

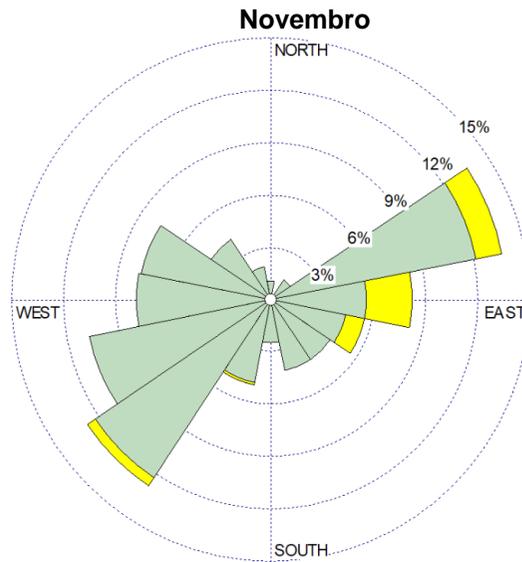


Calmaria:7,36%

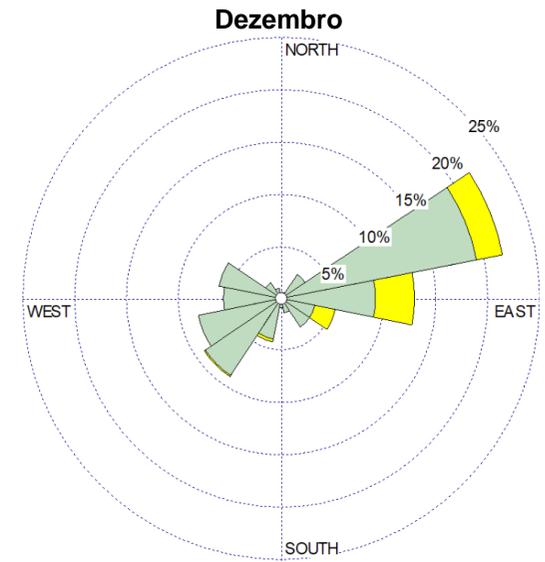
Figura 4.1.9: Rosas dos ventos de outubro, novembro e dezembro para estação de qualidade do ar RGV2 (Carapina) – Ano de 2021.



Calmaria:10,35%



Calmaria:8,47%
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

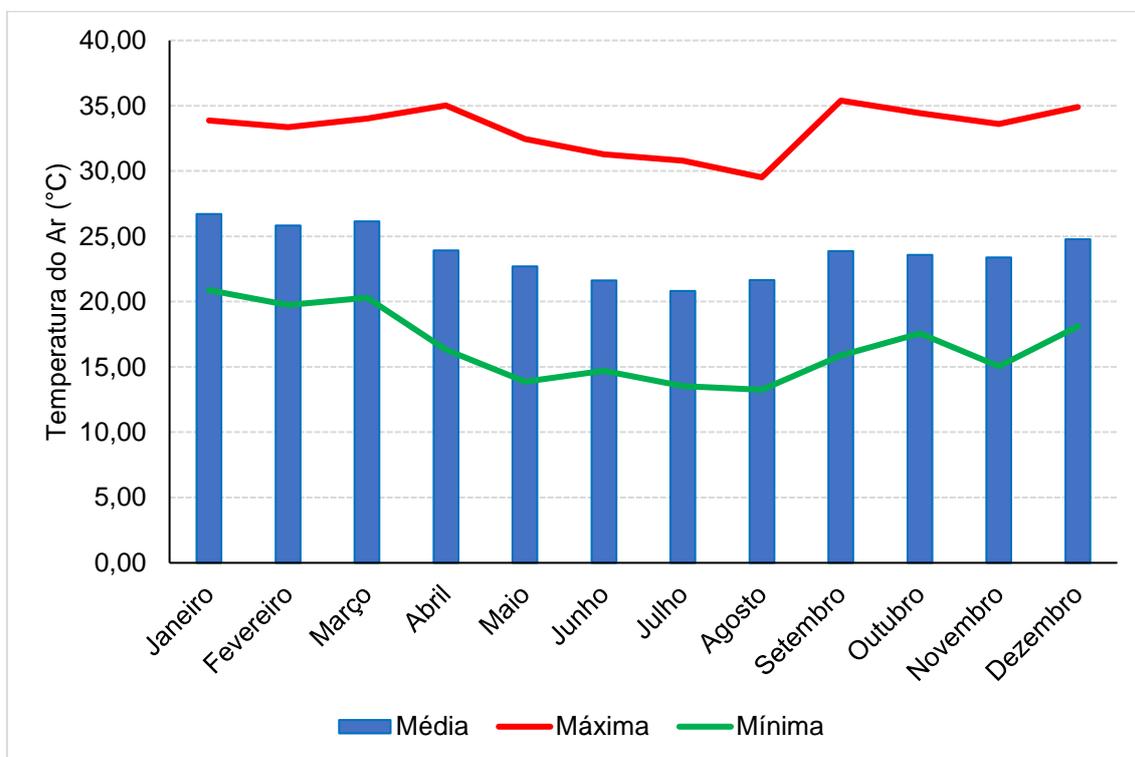


Calmaria:11,69%

4.2.2. Temperatura do Ar

A figura a seguir (**Figura 4.1.10**), apresenta os valores de temperatura média, máxima e mínima medidas na estação Carapina durante o ano de 2021.

Figura 4.1.10: Temperatura do ar média, máxima e mínima durante os meses de 2021.



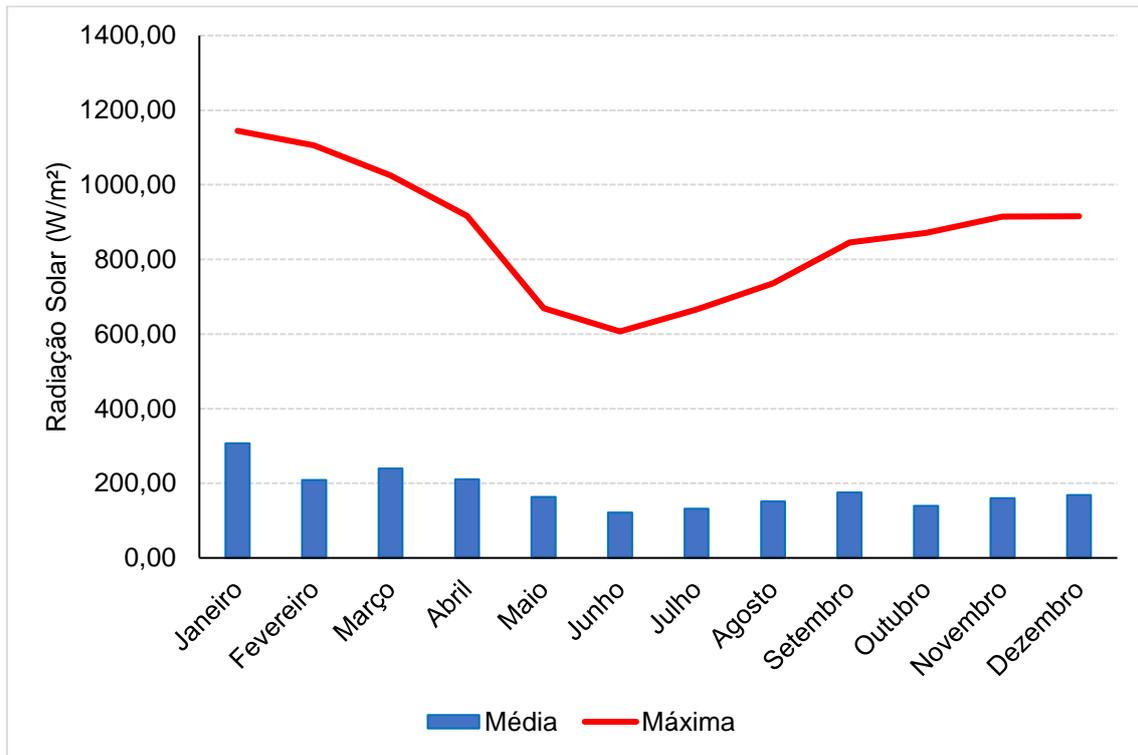
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

É observado que não há grandes variações da temperatura média durante os meses dos anos. Além disso, nota-se as maiores temperaturas médias durante os meses de verão (dezembro-março). A temperatura média medida no ano de 2021 é de 23,72°C, máxima de 35,39°C registrada no mês de setembro e mínima de 13,25°C no mês de agosto.

4.2.3. Radiação Solar

Na **Figura 4.1.11** é possível verificar o comportamento dos valores registrados de radiação solar ao longo do ano de 2021. A radiação média em 2021 foi de 180,90 W/m² e máxima de 1.144,60 W/m².

Figura 4.1.11: Radiação solar média e máxima durante os meses de 2021.

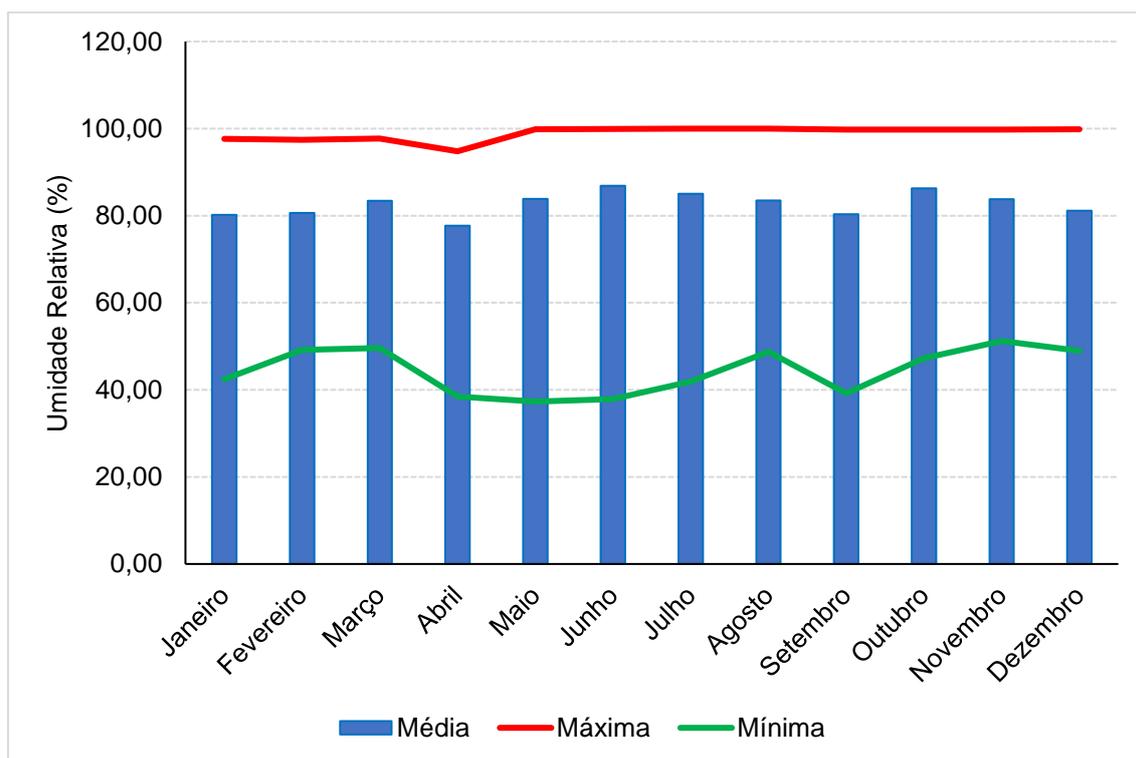


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.2.4. Umidade Relativa

A **Figura 4.1.12** apresenta a umidade relativa mensal, média, máxima e mínima ao decorrer dos meses do ano de 2019. Vale ressaltar que não havia dados disponíveis deste parâmetro para os anos de 2021 e 2020, sendo assim foram utilizados os dados do ano de 2019 para análise.

Figura 4.1.12: Umidade relativa média, máxima e mínima durante os meses de 2019.



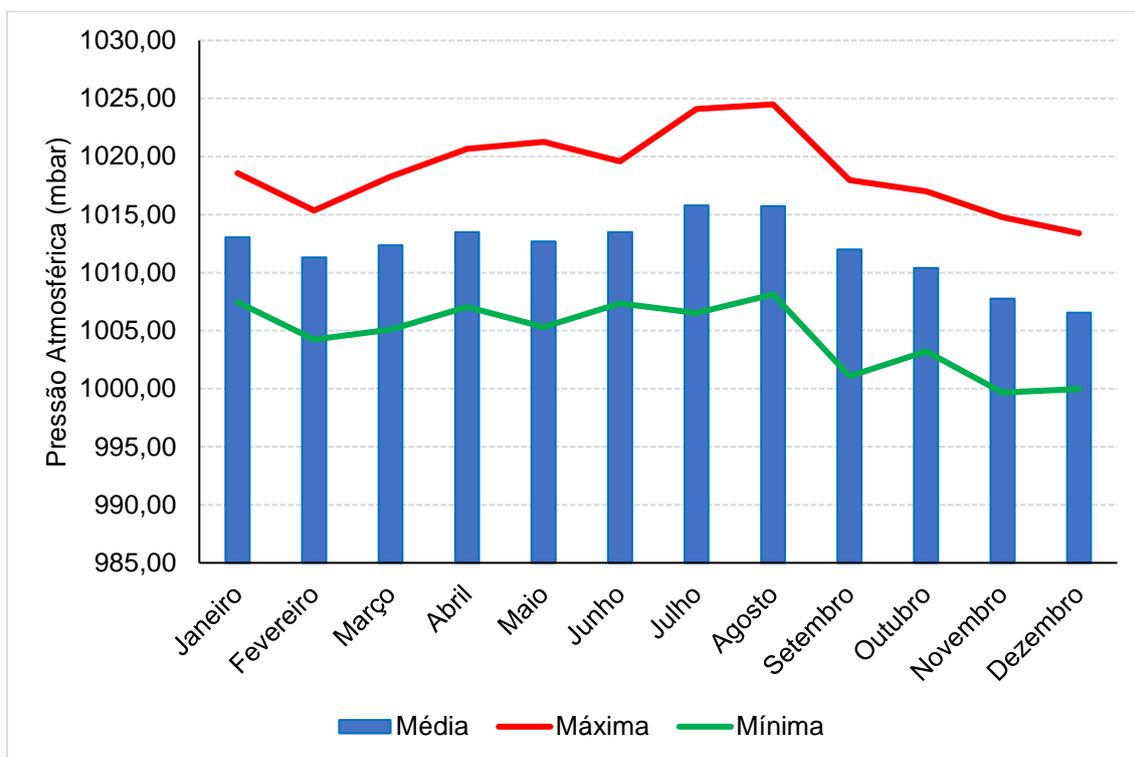
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Verifica-se que a umidade relativa média durante os meses não apresenta grande variação. Sendo a umidade relativa média anual de 82,67%, máxima de 100% e mínima de 37,30% registrada no mês de abril.

4.2.5. Pressão Atmosférica

A figura abaixo (**Figura 4.1.13**), apresenta a pressão atmosférica mensal média, máxima e mínima durante o ano de 2021.

Figura 4.1.13: Pressão atmosférica média, máxima e mínima durante os meses de 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

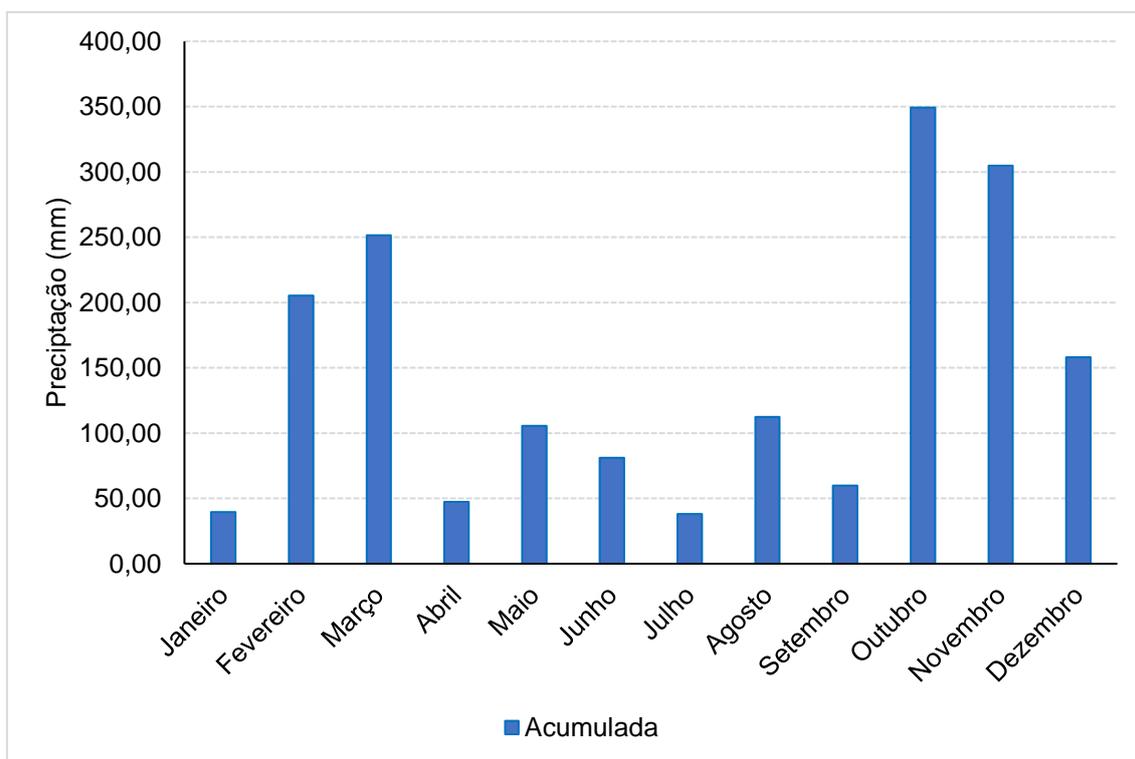
A pressão média anual medida foi de 1.012,06 mbar, máxima de 1.024,49 mbar registrada no mês de agosto e mínima de 999,66 mbar registrada no mês de novembro. Além disso, é possível verificar as altas pressões foram registradas durante os meses de inverno (julho a setembro). Segundo o IEMA (2020), este comportamento está à migração dos centros de alta pressão do oceano para o continente.

4.2.6. Precipitação

A **Figura 4.1.14** apresenta a precipitação acumulada durante os meses de 2021.

No município da Serra, normalmente o período mais chuvoso se inicia em novembro e se estende até março devido a atuação de sistemas sinóticos que favorecem o aumento da precipitação. É possível verificar este comportamento na figura. Entretanto observa-se períodos atípicos registrados como altos índices de precipitação para o mês de outubro.

Figura 4.1.14: Precipitação acumulada durante os meses de 2021.

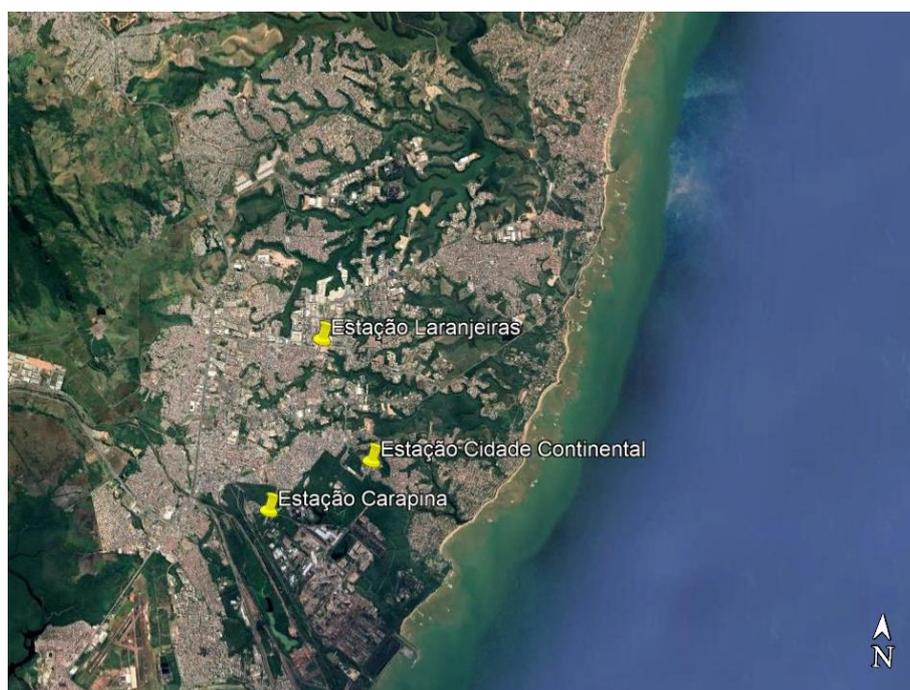


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3. ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

O município da Serra possui 3 estações de monitoramento da qualidade do ar gerenciadas pelo IEMA. Sendo elas localizadas nos bairros de Laranjeiras, Carapina e em Cidade Continental (**Figura 4.1.15**).

Figura 4.1.15: Localização das estações de monitoramento de qualidade do ar na Serra.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O quadro (**Quadro 4.1.1**) a seguir apresenta os parâmetros monitorados e descrição de abrangência e fontes de influência de cada estação.

Quadro 4.1.1: Parâmetros monitorados e descrição da área de influência de cada estação.

Estação	Parâmetros monitorados	Descrição de abrangência e fontes de influência
Laranjeiras	MP ₁₀ , SO ₂ , NO, NO ₂ , NO _x , CO, O ₃	Influências diretas das indústrias da Ponta de Tubarão quando da ocorrência de ventos sul e demais indústrias do CIVIT quando a concorrência de ventos Nordeste.
Carapina	MP ₁₀ , DV,P,PP,RS,SIGT, UR,VV,T	Esta estação capta influências das indústrias da Ponta de Tubarão em determinadas condições de vento.
Cidade Continental	SO ₂ , NO ₂ , DV, VV	É influenciada diretamente pelas indústrias da Ponta de Tubarão, e sofre influência relativa de veículos e outras fontes da Serra.

Fonte: Adaptado de IEMA (2021).

Legenda: DV: Direção do Vento; P: Pressão Atmosférica; PP: Precipitação Pluviométrica; RS: Radiação Solar; SIGT: Desvio Padrão da Direção do Vento; T: Temperatura; UR: Umidade Relativa; VV: Velocidade do Vento.

4.4. DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL E MALHA DE RECEPTORES

O domínio computacional foi escolhido de maneira a conter todas as fontes contempladas no Inventário de Emissões Atmosféricas da Região da Grande Vitória (**Figura 5.1**). O domínio foi definido de modo que a malha de receptores fosse de 50 quilômetros por 50 quilômetros.

Figura 4.1.16: Domínio computacional de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os pontos receptores discretos (PRD) escolhidos foram as estações de monitoramento da Serra, de forma que pudesse ser realizada a comparação entre os valores obtidos na modelagem e o valor medido nas estações. Além disso foram considerados mais 9 pontos, sendo eles alguns bairros do município. A **Tabela 4.1.1** apresenta a descrição destes pontos.

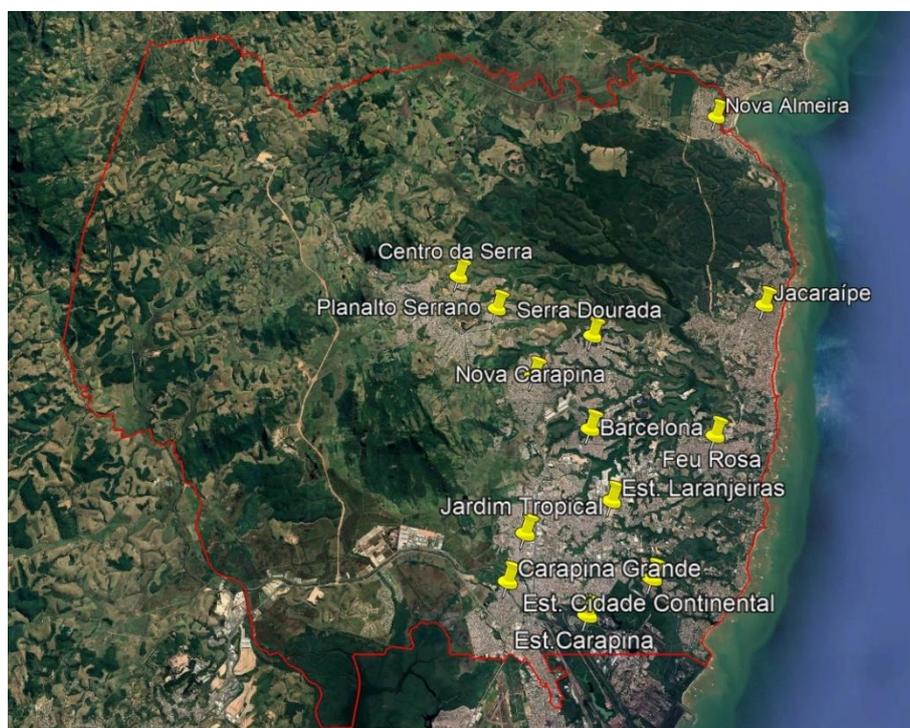
Tabela 4.1.1: Descrição dos pontos receptores discretos definidos.

PRD	Descrição do Ponto	Longitude (m)	Latitude (m)
1	Centro Serra	364.462	7.774.930
2	Jacaraípe	375.939	7.773.852
3	Nova Almeida	374.701	7.781.996
4	Feu Rosa	373.740	7.768.733
5	Barcelona	369.247	7.768.949
6	Nova Carapina	367.238	7.770.975
7	Jardim Tropical	366.860	7.765.119
8	Planalto Serrano	365.902	7.773.628
9	Serra Dourada	369.450	7.772.565
10	Estação Laranjeiras	369.917	7.766.305
11	Estação Carapina	368.945	7.762.315
12	Estação Cidade Continental	371.218	7.763.588

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A Figura a seguir (**Figura 4.1.17**) apresenta a localização dos pontos receptores definidos.

Figura 4.1.17: Pontos receptores discretos definidos para análise.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Quadro 4.1.2: Parâmetros necessários para modelagem de cada tipo de fonte.

Tipo de Fonte	Descrição	Parâmetros necessários para modelagem
Pontual	As fontes pontuais são definidas como fontes similares a um ponto, tal como chaminés.	Coordenadas (UTM) e elevação do terreno (m), altura de lançamento (m), diâmetro da fonte (m), velocidade de saída dos gases (m/s), temperatura (°C) e taxa de emissão (kg/h).
Área	As fontes de área são aquelas fontes em polígonos que precisam ser declaradas para que a fonte seja devidamente representada.	Coordenadas (UTM) e elevação do terreno (m), altura de lançamento (m), número de vértices e respectivas coordenadas (UTM), dimensão inicial vertical da pluma (m) e taxa de emissão (kg/h.m ²).
Volume	As fontes volumétricas são consideradas fontes de pequenas dimensões que são interpretadas em três dimensões, como por exemplo, transferência entre correias transportadoras, armazenagem de matéria prima em pilhas, descarregamento de caminhões, entre outras.	Coordenadas (UTM) e elevação do terreno (m), altura de lançamento (m), dimensão inicial vertical e lateral da pluma (m) e taxa de emissão (kg/h).
Linha	As fontes de linha são aquelas se caracterizam como uma sequência de fontes pontuais.	Coordenadas (UTM) e elevação do terreno (m), altura de lançamento (m), comprimento da linha (m) e taxa de emissão (kg/h.m).

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.6. SISTEMA DE MODELAGEM CALPUFF

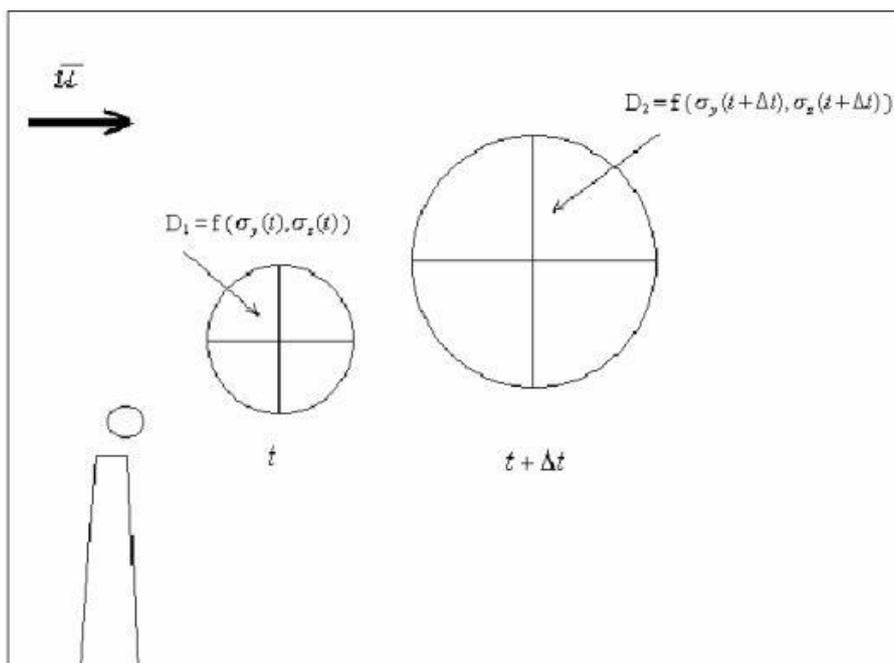
A modelagem matemática da dispersão atmosférica utiliza de equações matemáticas, para descrever a atmosfera, dispersão e processos químicos e físicos dentro de uma pluma, para assim calcular as concentrações em diferentes locais (HOLMES e MORAWSKA, 2006).

O Californian Puff Model (CALPUFF) é um modelo de dispersão de sopro multicamadas e multiespécies de estado não estacionário que tem sido amplamente empregado para modelar o ar poluição níveis de concentração e dispersões para várias fontes em um determinado período (ABDUL-WAHAB et al, 2018). E foi adotado pela *United States Environmental Protection Agency* (US-EPA) como modelo regulatório para estudos de impacto ambiental que abrangem distâncias de 50 a 300 km e que incluam topografia e sistemas meteorológicos complexos (GOMES e BIASUTTI, 2012).

Os modelos do tipo *puff* representam a pluma por meio de um número muito grande de pacotes discretos de material poluente. Cada um desses *puff* dispõe de uma determinada massa que é distribuída de maneira uniforme inicialmente. O transporte do *puff* realiza-se de acordo com a trajetória de seu centro de massa (determinada pelo vetor velocidade do vento local). Ao decorrer da trajetória, o *puff* se expande de maneira Gaussiana segundo os coeficientes de dispersão (σ_x , σ_y e σ_z), coeficientes que são dependentes do tempo, sendo os responsáveis pelo crescimento de cada *puff*.

A **Figura 4.1.19** apresenta a evolução de um *puff* emitido por uma fonte pontual (chaminé).

Figura 4.1.19: Evolução de um puff emitido por uma fonte pontual.



Fonte: MORAES (2004).

O sistema de modelagem CALPUFF inclui três componentes principais: CALMET, CALPUFF E CALPOST e um grande conjunto de programas de pré-processamento projetados para fazer a interface do modelo com conjuntos de dados meteorológicos e geofísicos padrão, disponíveis rotineiramente.

Segundo OSHAN et. al (2006) a aplicação nas quais o uso do CALPUFF é apropriado são:

- Impactos próximos ao solo em fluxos complexos ou situações de dispersão de terreno complexo, condições de inversão, recirculação, estagnação e fumigação, transporte sobre água e condições costeiras e condições de ventos calmos com baixa velocidade;
- Transporte de longo alcance;
- Avaliação de velocidade;
- Modelagem de poluentes críticos para elaboração de Planos Estaduais de Implementação (SIP);
- Formação de poluente secundário e modelagem de material particulado;
- Áreas flutuantes e fontes de linha.

4.6.1. CALMET

Segundo Scire et al (2000), resumidamente o CALMET é um modelo meteorológico que desenvolve campos horários de vento e temperatura em um domínio de modelagem em grade tridimensional. Além disso, inclui dados meteorológicos associados a campos de duas dimensões como por exemplo altura da mistura, características de superfície e propriedades de dispersão.

Para processamento do CALMET são necessários de dados meteorológicos horários em superfície, dois perfis diários de dados de altitude e dados geofísicos que são compostos por elevação do terreno e categorias de uso do solo.

Os dados meteorológicos de superfície e de altitude (ar superior) mínimos necessários para a modelagem são apresentados no quadro a seguir (**Quadro 4.1.3**).

Quadro 4.1.3: Observações meteorológicas do CALMET.

DADOS DE SUPERFÍCIE	Velocidade do vento	Direção do vento	Temperatura	Pressão na superfície	Umidade Relativa
	Precipitação	Código do tipo de precipitação	Cobertura de nuvens	Altura da 1° Camada de nuvem	
DADOS DE ALTITUDE	Velocidade do vento	Direção do vento	Temperatura	Pressão	Elevação

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Estes dados foram obtidos da estação do Aeroporto de Vitória – Espírito Santo (83649) que são disponibilizados pela *National Centers For Environmental Information* (NOAA), pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e *Iowa Environmental Mesonet* (IEM).

Já os dados de elevação de terrenos utilizados foram os obtidos do modelo digital de elevação Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Segundo USGS, os dados de SRTM é um produto de um projeto da *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O objetivo SRTM foi produzir um banco de dados digitais para toda as áreas de terra entre as latitudes 60° norte e 56° sul.

A técnica utilizada para levamento dos dados para interferometria de radar de abertura sintética. Os dados brutos foram processados pela NASA e

disponibilizado na forma *DEM (Digital Elevation Models)* de forma gratuita pela *United States Geological Survey (USGS)*.

Neste projeto foram utilizadas informações topográficas com resolução de 90 metros do SRTM, no formato HGT e o arquivo utilizado foi o S21W041.

O arquivo de controle de entrada de dados do CALMET é o CALMET.INP. Neste arquivo são estruturados os nomes e diretórios dos arquivos de entrada e saída do modelo, o período de simulação, os parâmetros para cálculo meteorológico, entre outros.

Os dados meteorológicos de superfície e altitude são inseridos no CALMET por meio dos arquivos SURF.DAT e PRECIP.DAT. No primeiro arquivo estão incluídos os dados de superfície exceto os dados de precipitação que são inseridos no segundo arquivo. Além disso, os dados meteorológicos de altitudes são inseridos no CALMET pelo arquivo UP.DAT. Já os dados de entrada do terreno são inseridos no modelo por meio do arquivo GEO.DAT.

Por fim, após a execução do modelo são obtidos dois arquivos, sendo eles CALMET.LST e CALMET.DAT. O primeiro arquivo consiste em um controle da simulação onde é possível identificar os erros da modelagem e alertas caso a mesma não tenha ocorrido de maneira apropriada. Já o segundo arquivo, é utilizado para entrada no CALPUFF.

4.6.2. CALPUFF

Como já citado anteriormente, o CALPUFF realiza a simulação da dispersão de poluentes a partir de um modelo gaussiano de puff. Para isso, são necessários os dados de fontes emissoras, receptores, caracterização geofísica e meteorológica, intervalo de processamento e parâmetros de controle.

As fontes emissoras utilizadas na simulação foram divididas em 4 grupos: fontes pontuais, fontes de área, fontes de linha e fontes volumétricas e os parâmetros necessários para simulação de cada fonte já foram apresentados na **Seção 5.2** do presente trabalho. Além da região escolhida do domínio computacional, foram incluídos 12 pontos discretos a malha, a localização das estações de monitoramento da qualidade do ar do município da Serra, com o objetivo de

comparar os dados de concentração estimados nestes pontos com os dados medidos e 9 pontos localizados em diferentes bairros do município estudado.

Os arquivos de entrada no CALPUFF são, o CALMET.DAT onde têm-se os dados de caracterização geofísica e meteorológica da região. E o arquivo CALPUFF.INP onde são determinados os parâmetros de modelagem.

Após o processamento do modelo, são gerados dois arquivos. O arquivo CALPUFF.LST que sumariza as opções escolhidas para a simulação, assim como apresenta eventuais mensagens de alertas e erro da simulação. O outro arquivo é o CONC.DAT que contém as concentrações dos poluentes nas médias de tempo e unidades selecionadas para os receptores ativados na modelagem.

4.6.3. CALPOST

O CALPOST é um pós-processador com opções para o cálculo de concentrações médias no tempo e fluxos de deposições previstos pelo CALPUFF (SCIRE et al, 2000).

Para o processamento do CALPOST são necessários 4 arquivos, sendo eles o CALPOST.INP o arquivo de controle onde é organizada a simulação, PARAMS.PST contendo a declaração dos valores dos parâmetros das variáveis, o CALPOST.EXE o executável do programa e o arquivo de saída do CALPUFF, o CONC.DAT.

No CALPOST, há diversas opções para o formato dos dados do arquivo de saída. Podendo o usuário optar o poluente desejado a ser impresso, a unidade de concentração, as médias de tempo e várias outras opções. Além disso, pode ser escolhido o ponto receptor para os quais serão exibidas as concentrações.

Quanto ao formato do arquivo, pode-se optar pela extensão dat ou grd. Sendo que os arquivos com extensão grd podem ser visualizados em um programa de reprodução gráfica.

4.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.7.1. Análise Estatística

Segundo Arya (1999) apud Vicentini (2011), modelos de dispersão atmosférica possuem um erro associado superior a 50%, sendo consideradas satisfatórias simulações em que as concentrações previstas estejam numa ordem entre a metade e o dobro da concentração monitorada.

Sendo assim, no presente trabalho foram avaliados os resultados modelados quanto a correspondência com as concentrações medidas nas estações de qualidade do ar (Laranjeiras, Cidade Continental e Carapina).

Os seguintes índices estáticos foram analisados: Média aritmética e desvio padrão, coeficiente de correlação, erro médio quadrático normalizado, desvio fracional e o fator de dois. A seguir são explanados cada um desses parâmetros estatísticos.

- **Média Aritmética e Desvio Padrão:**

A média aritmética foi utilizada para determinar se a concentração média simulada ficou próxima das concentrações médias na estação, a **Equação 1** utilizada é apresentada a seguir:

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^N x_i}{N} \text{ (Eq. 1)}$$

Enquanto isso, o desvio padrão representa o grau de dispersão dos valores em relação à média e foi calculada utilizando a **Equação 2**.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{N - 1}} \text{ (Eq. 2)}$$

Sendo:

\bar{x} : Média aritmética dos valores de x;

σ : Desvio padrão;

x_i : Representa os dados de concentração;

N: Número de medições realizadas no ano.

- **Coeficiente de Correlação:**

Este parâmetro foi utilizado para determinar a relação linear entre os valores simulados e os valores medidos. O valor da correlação pode ir de -1 a 1, sendo

que 1 indica que os valores têm comportamento diretamente correlacionados, -1 indica que os valores são inversamente correlacionados e 0 que não existe correlação. E é calculado da seguinte forma (**Equação 3**):

$$COR = \frac{\sum_1^N [(x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_1^N [(x_i - \bar{x})^2][Y_i - \bar{Y}]^2}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

COR: Coeficiente de Correlação;

x: Concentração modelada;

Y: Concentração medida;

N: Número de medições realizadas no ano.

- **Erro Médio Quadrático Normalizado:**

Este parâmetro indica os desvios gerais entre os valores modelados e os valores medidos. Segundo Gomes e Biasutti (2012), se o valor encontrando é próximo a 0 indica um bom desempenho do modelo no tempo e no espaço. O parâmetro pode ser calculado com a **Equação 4** apresentada a seguir:

$$NMSE = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{(X_i - Y_i)^2}{[(\frac{1}{N} \sum_1^N X_i) (\frac{1}{N} \sum_1^N Y_i)]} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

X, Y: Valores modelados e medidos, respectivamente;

N: Número de medições realizadas no ano.

- **Fator de Dois**

Este parâmetro aponta o percentual dos resultados que se encontram dentro de um erro de até 100% em relação as concentrações medidas. Valores mais próximos de 1 indicam uma melhor a simulação.

- **Desvio Fracional (FB)**

Indica se as concentrações médias modeladas estão superestimadas ou subestimadas em relação as concentrações médias medidas. O valor ideal é 0 e segundo Arya (1999) apud Vicentini (2011), valores entre -0,67 e 0,67 são

considerados satisfatórios. O desvio fracional é calculado pela equação abaixo (**Equação 5**):

$$FB = \frac{2 * (\bar{X} - \bar{Y})}{(\bar{X} + \bar{Y})} \text{ (Eq. 5)}$$

Sendo:

X, Y: Valores modelados e medidos, respectivamente.

4.7.2. Análise da Qualidade do Ar

Após a obtenção dos dados de concentração modelados de MP₁₀, MP_{2,5}, NO_x, SO₂ e CO realizou-se a comparação dos mesmos com os padrões de qualidade do ar dispostos na Resolução CONAMA N° 491/2018, Decreto Estadual N° 3463-R de 2013 e Organização Mundial da Saúde.

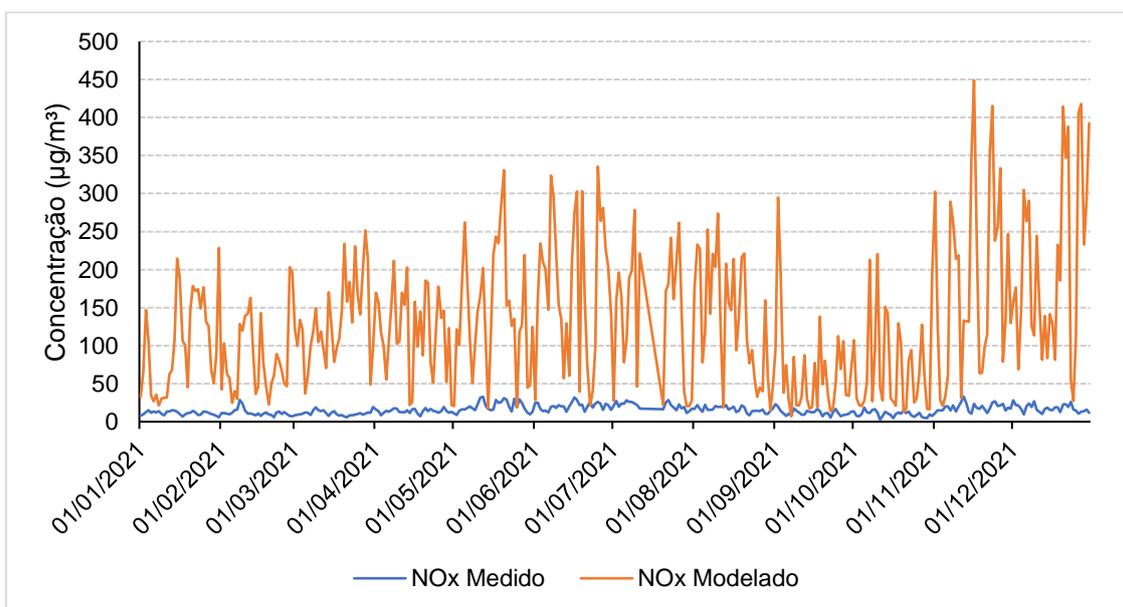
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A seguir são realizadas as análises comparativas a partir de gráficos de concentração diárias de NO_x, SO₂, CO e MP₁₀ medidos em 2021 nas estações de monitoramento e da modelagem nestes pontos.

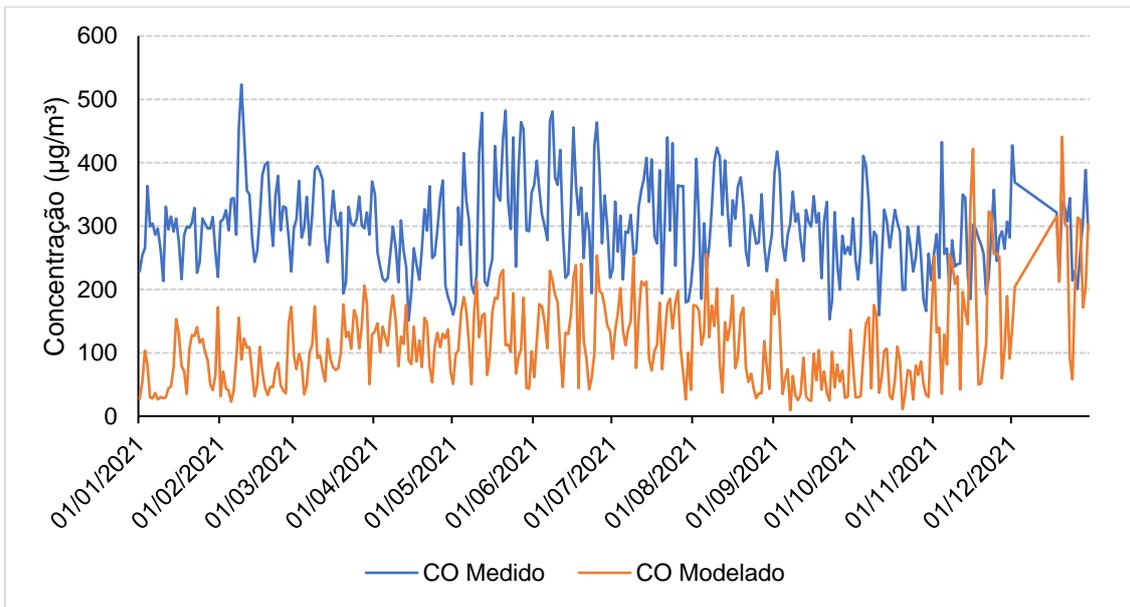
As figuras abaixo (**Figura 5.1** e **Figura 5.2**) apresentam a comparação gráfica entre as concentrações de NO_x e CO medidas e simuladas na Estação Laranjeiras. Através da análise dos gráficos é possível inferir que o modelo superestimou o poluente óxido de nitrogênio, enquanto subestimou o monóxido de carbono para este ponto receptor.

Figura 5.1: Médias diárias de NO_x medidas e simuladas na Estação Laranjeiras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

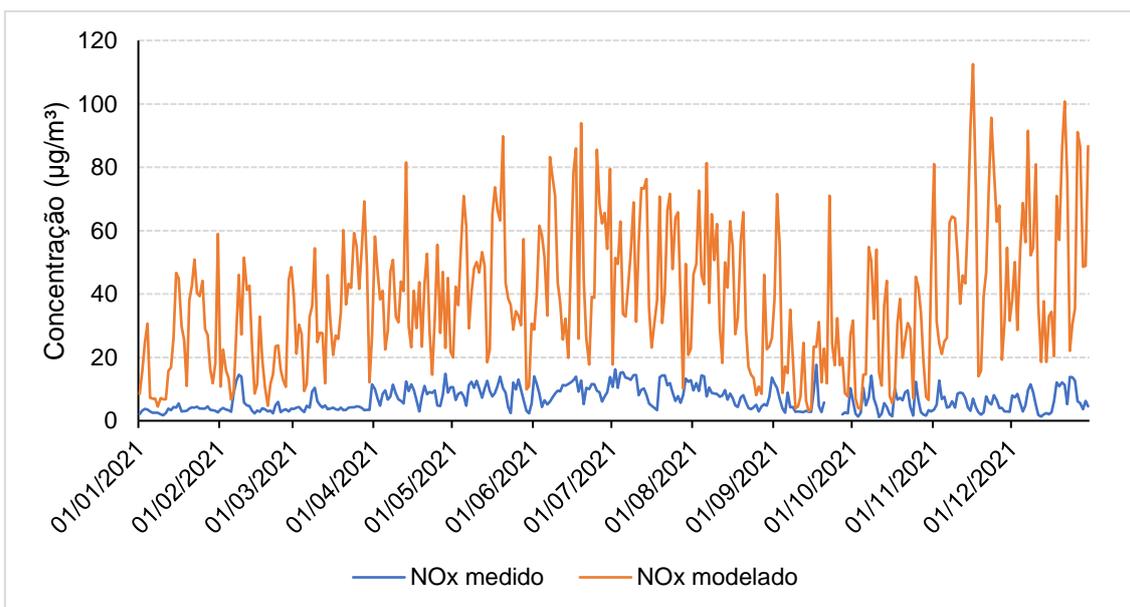
Figura 5.2: Médias diárias de CO medidas e simuladas na Estação Laranjeiras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

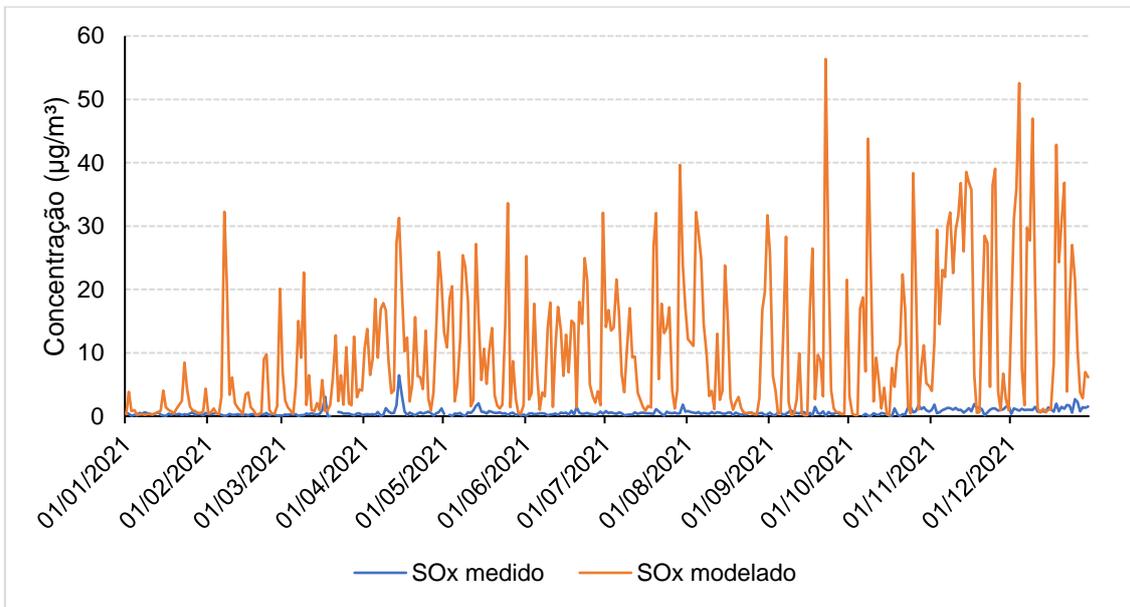
Já as Figuras **Figura 5.3** e **Figura 5.4** exibem as comparações da série de dados medidos e simulados de NO_x e SO_2 , respectivamente, na Estação Cidade Continental. De maneira similar à Estação Laranjeiras, o modelo superestimou as concentrações de NO_x em Cidade Continental. Assim como superestimou as concentrações de SO_2 .

Figura 5.3: Médias diárias de NO_x medidas e simuladas na Estação Cidade Continental.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

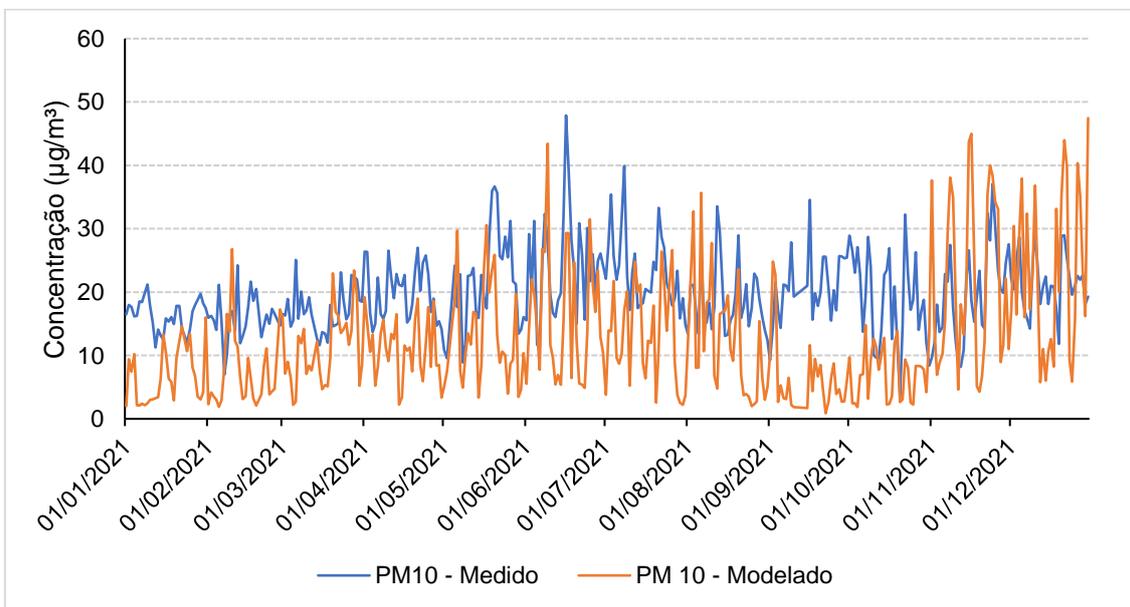
Figura 5.4: Médias diárias de SO₂ medidas e simuladas na Estação Cidade Continental.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Por fim na **Figura 5.5**, é possível notar melhor correlação nos dados de MP₁₀ medidos e simulados na estação Carapina, quando comparado às figuras anteriores.

Figura 5.5: Médias diárias de MP₁₀ medidas e simuladas na Estação Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A seguir são apresentados os resultados dos índices estatísticos calculados para a análise comparativa entre os dados medidos e simulados. Além disso, estes resultados são comparados com trabalhos de outros autores que utilizaram o mesmo modelo utilizado no estudo (CALPUFF). Dando mais ênfase em estudos que realizaram análises na mesma região ou em uma região próxima da do estudo, sendo eles:

- SOARES e RAMALDES (2012): Estudo Comparativo dos Modelos de Dispersão Atmosférica - CALPUFF e AERMOD - Através da Análise da Qualidade do Ar na Região Metropolitana da Grande Vitória.
- MONTICELLI (2020): Estimating Asthmatic Children Exposure and Dose to Air Pollutants in an Urban Industrialized Area.

A **Tabela 5.1** apresenta os indicadores estatísticos obtidos para a relação entre as concentrações médias diárias medidas nas estações localizadas no município da Serra e simuladas nestes mesmos pontos.

Tabela 5.1: Resultados obtidos para os índices estatístico calculados.

Índice Estatístico	Estação Laranjeiras		Estação Cidade Continental		Estação Carapina	Valor Ideal
	NO _x	CO	NO _x	SO ₂	MP ₁₀	
Média Anual Modelada± Desvio Padrão (µg/m ³)	131,63±90,42	118,38±71,52	38,01±22,11	10,14±11,08	12,45±9,56	-
Correlação	0,34	0,17	0,34	0,21	0,31	1
NMSE	9,66	1,15	4,98	29,18	0,55	0
FB (Desvio Fracional)	1,58	-0,87	1,39	1,78	-0,46	0
Fator de Dois	0,10	0,29	0,08	0,15	0,51	1
Média Anual Medida ± Desvio Padrão (µg/m ³)	15,29±5,89	299,99±68,50	6,79±3,70	0,59±0,56	19,85±6,14	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Verifica-se na tabela acima que os índices de correlação obtidos foram inferiores ao valor ideal.

Os valores encontrados para NO_x estão abaixo do valor de 0,99 obtido por Jittra et al (2015) e do menor valor apresentado por Monticelli (2020) de 0,68.

Os autores Soares e Ramaldes (2012) encontraram um coeficiente de correlação de 0,24 para o MP_{10} na Estação Carapina. Enquanto Monticelli (2020) obteve valores inferiores para o mesmo poluente, sendo eles: 0,08; 0,30 e -0,12 em estações localizadas em um município próximo a Serra.

Já o valor de 0,21 obtido para o SO_2 foi inferior os valores de 0,98 e 0,27 encontrados por Jittra et al (2015) e Monticelli (2020), respectivamente. Por fim o valor de correlação para CO apresentado nesse estudo foi inferior ao valor de 0,81 obtido por Monticelli (2020).

Em relação ao erro médio quadrático normalizado observa-se que todos os resultados obtidos foram superiores ao valor ideal de 0. Entretanto o valor de NMSE para MP_{10} na Estação Carapina foi inferior ao resultado de 0,93 encontrado por Soares e Ramaldes (2012) no mesmo ponto, indicando um bom desempenho do modelo neste caso.

Enquanto isso, os erros quadráticos médios normalizados calculados para NO_x não foram inferiores ao valor de 1,34 e 0,43 obtido por Amoatey (2018) e Monticelli (2020), respectivamente.

Observa-se o mesmo comportamento do índice para o SO_2 , o valor calculado foi superior ao obtidos por Amoatey (2018), Monticelli (2020) e Jittra et al (2015). Finalmente, o valor de 0,48 encontrado pelo autor Monticelli (2020) para o monóxido de carbono foi inferior ao deste estudo.

Ao analisar os resultados do desvio fracional (FB) pode-se inferir que para NO_x e SO_2 os resultados encontrados foram superiores ao valor ideal indicando uma superestimação do modelo, enquanto para o MP_{10} e CO têm-se uma subestimação.

Os autores Soares e Ramaldes (2012) obtiveram um FB de -0,195 para MP_{10} na Estação Carapina, valor mais próximo ao ideal quando comparado ao do presente trabalho.

Diferentemente do resultado do presente estudo, Monticelli (2020) e Jittra et. al. (2015) encontraram valores de FB que indicam subestimação do modelo para o poluente NO_x , com valores de -0,50 e -0,01, respectivamente. Sendo o valor encontrado na simulação de Jittra o mais próximo do ideal.

Em relação ao SO_2 , Amoatey (2018), Dresser e Huizer (2011) e Monticelli (2020) também obtiveram resultados que indicam superestimação do modelo para o poluente.

Por fim, foi possível analisar que o valor de FB calculado por Monticelli (2020) também indicou uma subestimação do modelo em relação ao poluente.

Verificando os valores obtidos para o fator de dois é possível inferir que os resultados se apresentaram menores que 1, considerado o valor ideal. Sendo o “pior” valor de 0,08 para o NO_x na Estação Cidade Continental e 0,51 o mais próximo do ideal calculado para o MP_{10} na Estação Carapina. Os valores encontrados por Monticelli (2020) para o mesmo índice e poluentes também foram menores que 1.

No geral, foi possível verificar que a modelagem para o MP_{10} na Estação Carapina foi a que apresentou melhor desempenho em relação aos índices estatísticos calculados no presente estudo.

5.2. ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR

5.2.1. Material Particulado Inferior a 10 µm (MP₁₀)

Ao longo desta seção são apresentados e analisados os resultados simulados no que diz respeito ao Material Particulado inferior a 10 µm (MP₁₀).

A **Figura 5.6** a **Figura 5.17**, apresentam a comparação gráfica dos resultados obtidos na modelagem em cada ponto receptor discreto com os padrões de qualidade do ar de curto período dispostos na Resolução CONAMA N° 491/2018 (120 µg/m³), no Decreto N° 3463-R/2013 (120 µg/m³) e no Guia da Qualidade do Ar da OMS (45 µg/m³).

Figura 5.6: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Estação Laranjeiras.

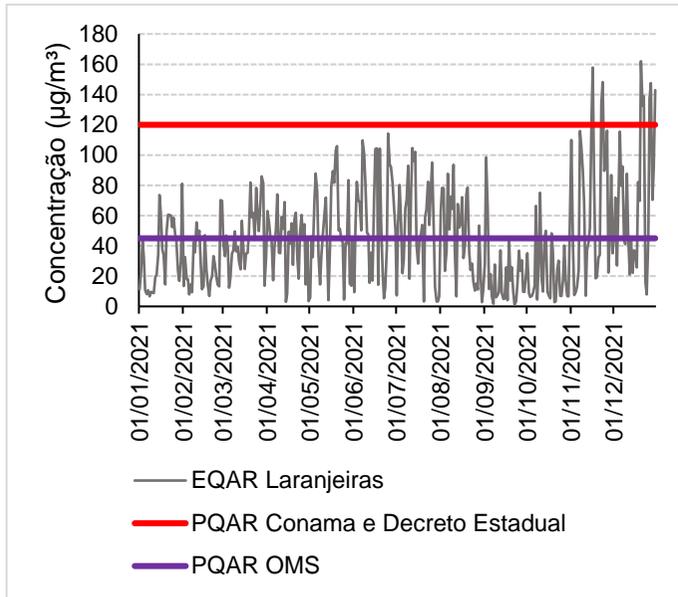


Figura 5.7: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Estação Cidade Continental.

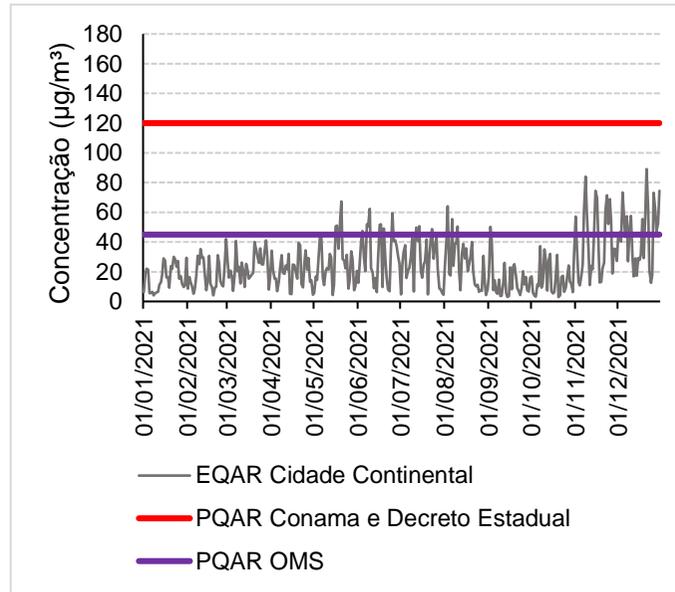
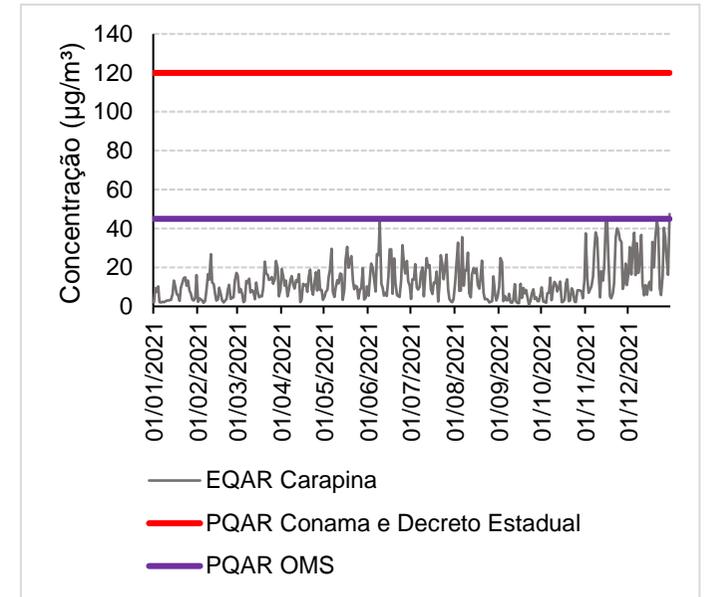


Figura 5.8: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Estação Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.9: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Centro Serra

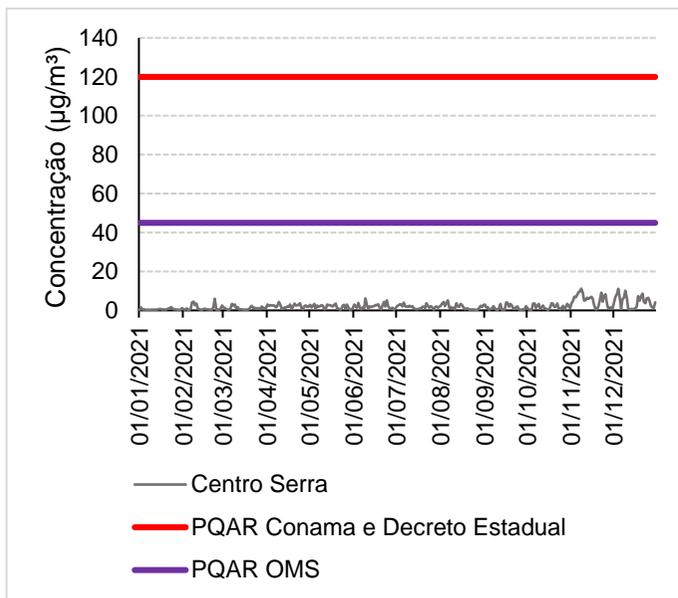


Figura 5.10: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Jacaraípe

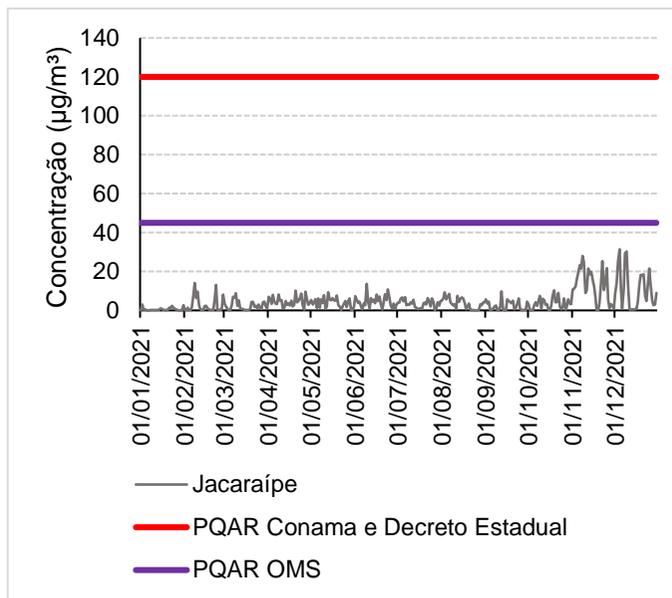
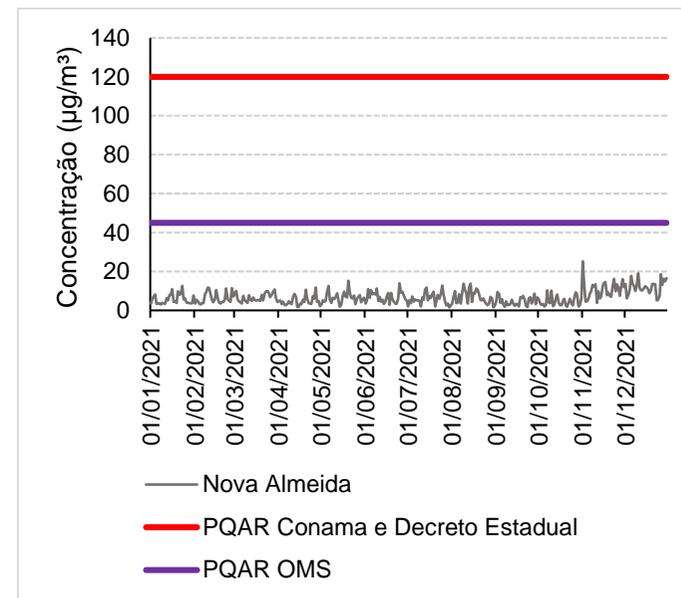


Figura 5.11: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Nova Almeida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.12: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Feu Rosa

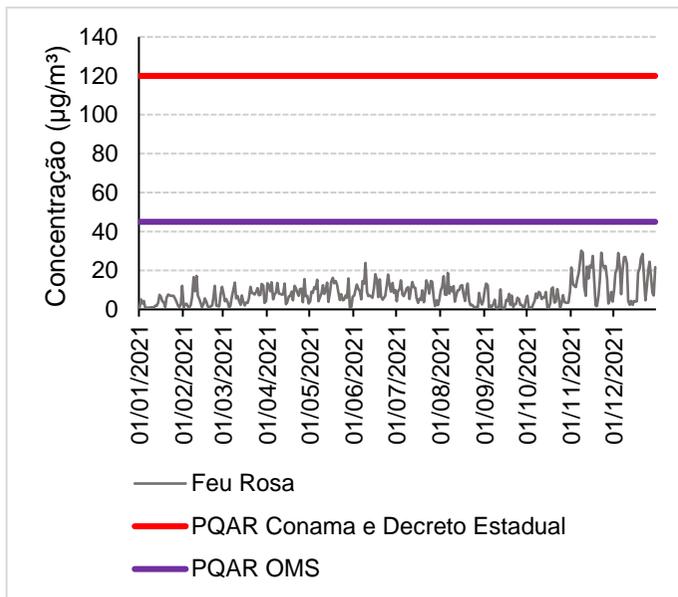


Figura 5.13: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Barcelona

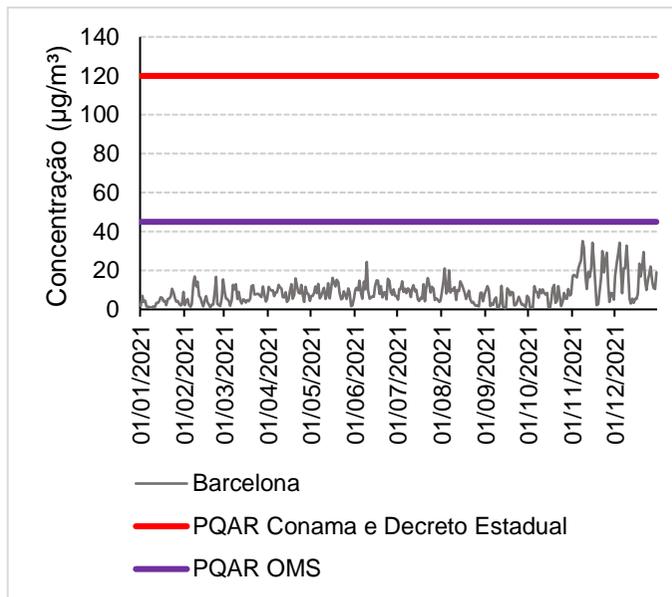
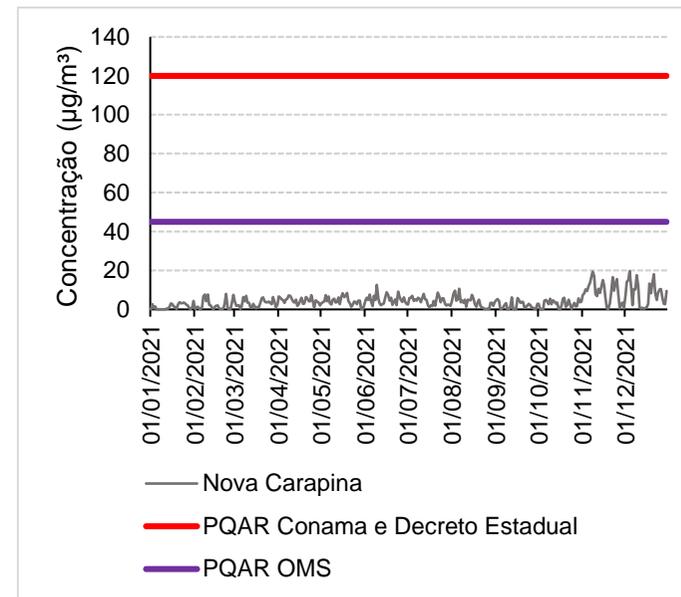


Figura 5.14: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Nova Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.15: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Jardim Tropical

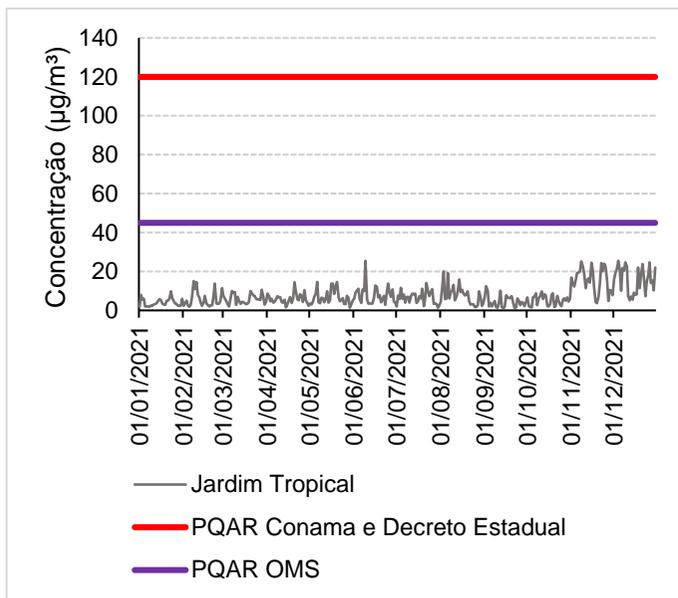


Figura 5.16: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Planalto Serra

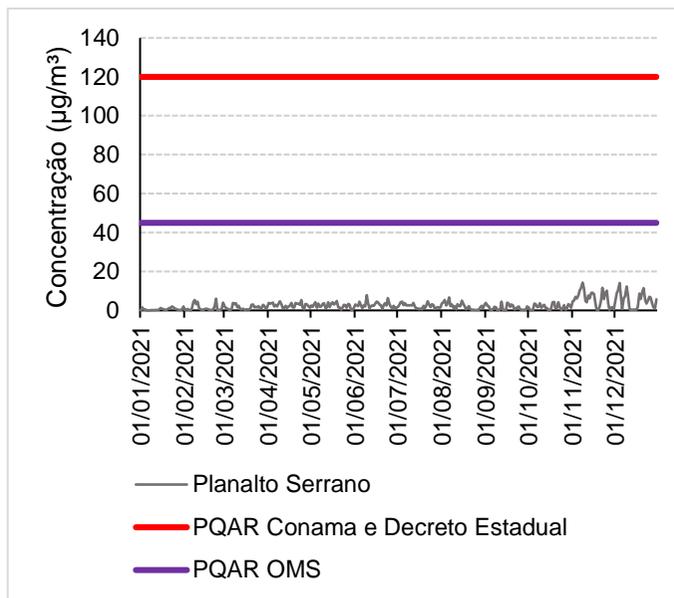
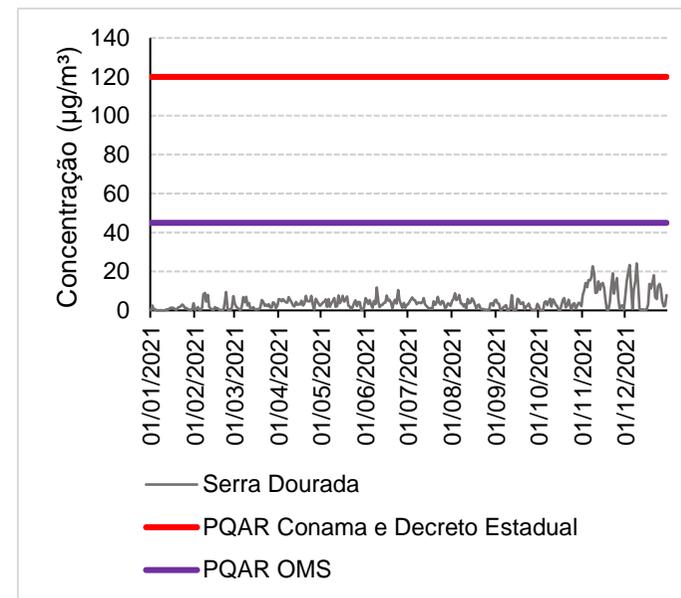


Figura 5.17: Evolução das Médias de 24 horas de MP₁₀ – Serra Dourada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Nota-se que as maiores concentrações simuladas foram na Estação Laranjeiras. Neste ponto foram registradas 10 ultrapassagens em relação ao padrão de qualidade do ar dispostos na CONAMA e no Decreto Estadual. A maior concentração modelada na estação (161,97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) representa 135% do PQAR nacional e estadual. Em relação aos outros pontos de estudo, é observado que o valor do padrão de qualidade do ar nacional e estadual (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) não foi violado em nenhum dos dias do período modelado.

O valor estabelecido pela OMS tem um viés mais restritivo do que o padrão nacional e estadual, sendo assim, é possível verificar ultrapassagens deste valor nas estações de qualidade do ar da Serra, enquanto nos outros pontos observa-se o comportamento contrário. Este fato pode ser explicado devido as estações estarem sobre maior influência das emissões advindas da Porto de Tubarão, tendo, dessa forma, concentrações mais elevadas em relação aos outros pontos deste estudo.

A **Tabela 5.2** apresenta as médias anuais simuladas de MP_{10} em cada ponto receptor considerado neste estudo. Nota-se que o resultado obtido simulado na Estação Laranjeiras ultrapassa os PQAr estabelecidos pela CONAMA (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e OMS (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Assim como, verifica-se que na Estação Cidade Continental o valor de concentração média anual simulada foi superior ao padrão da Organização Mundial da Saúde. Entretanto, as médias anuais apresentadas não ultrapassam o limite estabelecido pela legislação estadual (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabela 5.2: Média anual das concentrações simuladas de MP₁₀.

Ponto	Média Anual (µg/m³)
Centro Serra	2,16
Jacaraípe	4,66
Nova Almeida	6,80
Feu Rosa	8,32
Barcelona	8,99
Nova Carapina	4,28
Jardim Tropical	7,63
Planalto Serrano	2,54
Serra Dourada	4,10
Estação Laranjeiras	44,83
Estação Carapina	12,45
Estação Cidade Continental	24,98

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.2.2. Material Particulado Inferior a 2,5 µm (MP_{2,5})

As concentrações simuladas de material particulado inferior a 2,5 µm apresentados ao longo desta seção são comparados graficamente (**Figura 5.18** a **Figura 5.29**) aos referidos padrões de curto período (24 horas), sendo: 60 µg/m³, 50 µg/m³ e 15 µg/m³ estabelecidos pela CONAMA, Decreto N° 3463-R/2013 e OMS, respectivamente. Além disso, compara-se aos padrões de longo período (anual) conforme apresentado na **Tabela 5.3**.

Figura 5.18: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5}– Estação Laranjeiras.

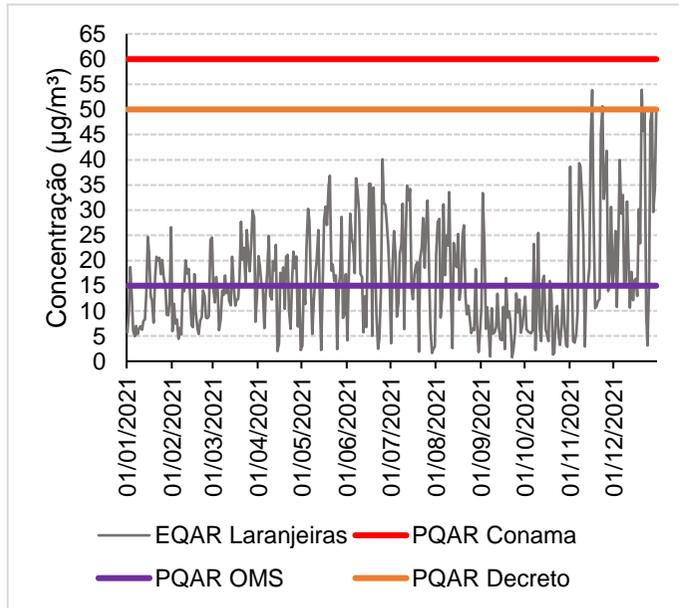


Figura 5.19: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5}– Estação Cidade Continental.

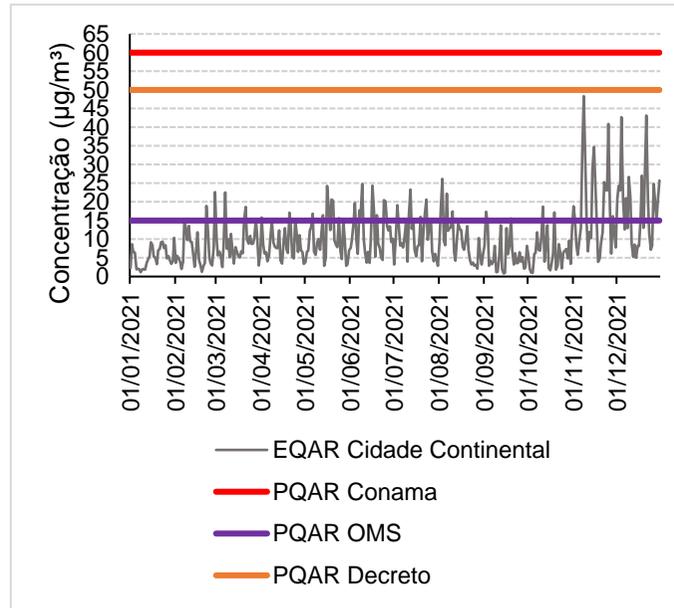
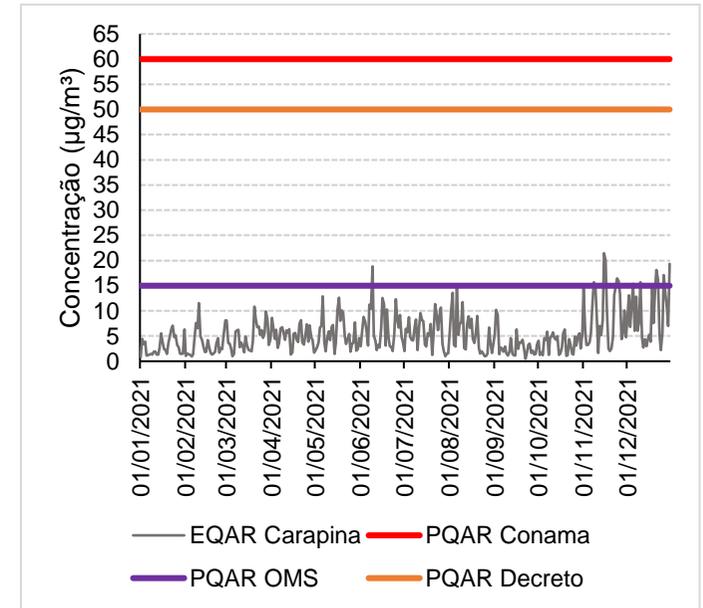


Figura 5.20: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5}– Estação Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.21: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5} – Centro Serra.

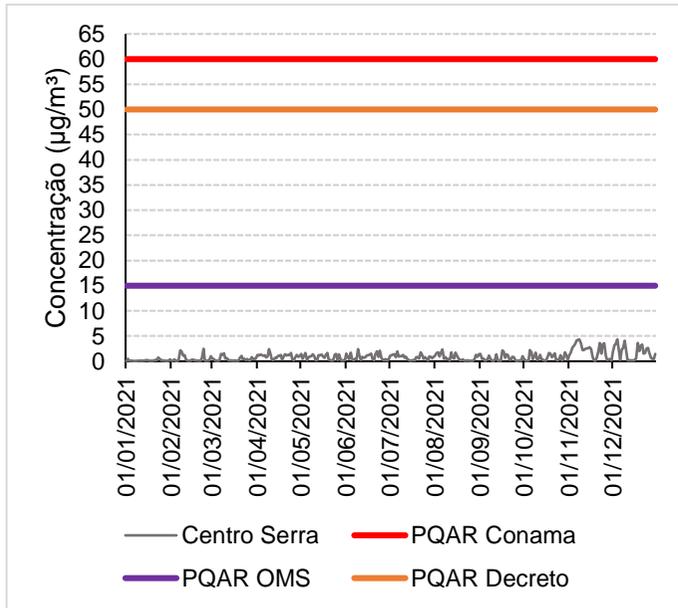


Figura 5.22: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5} – Jacaraípe.

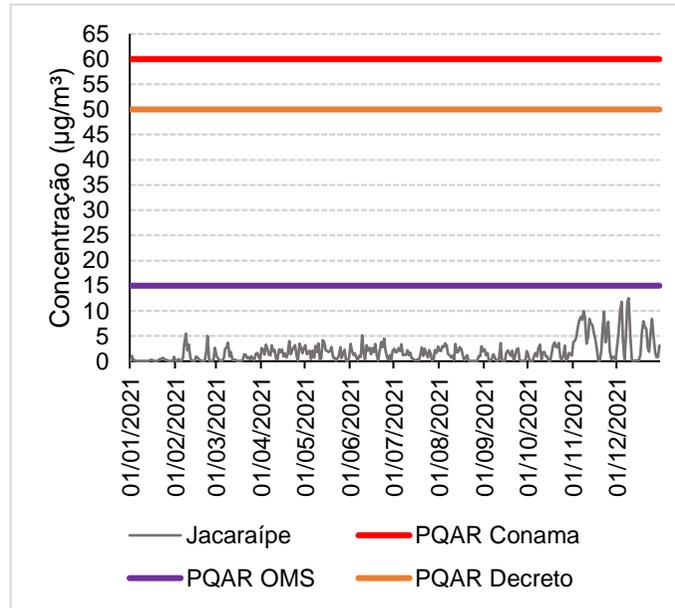
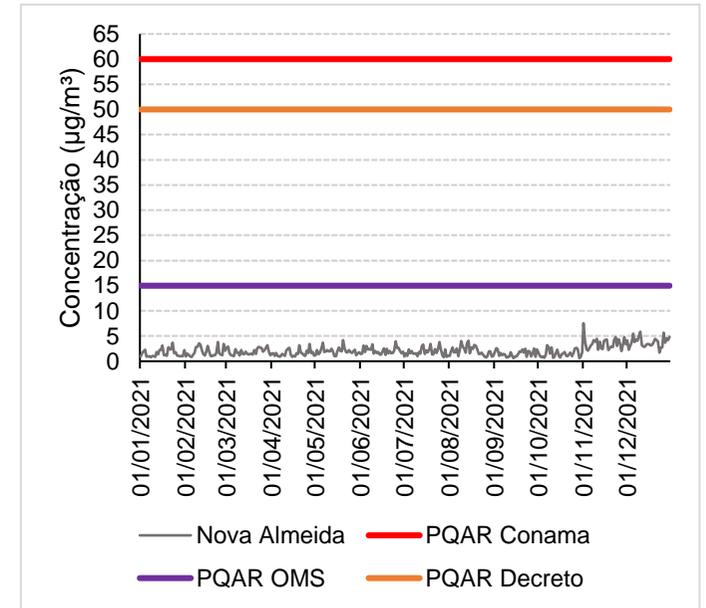


Figura 5.23: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5} – Nova Almeida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.24: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5} – Feu Rosa.

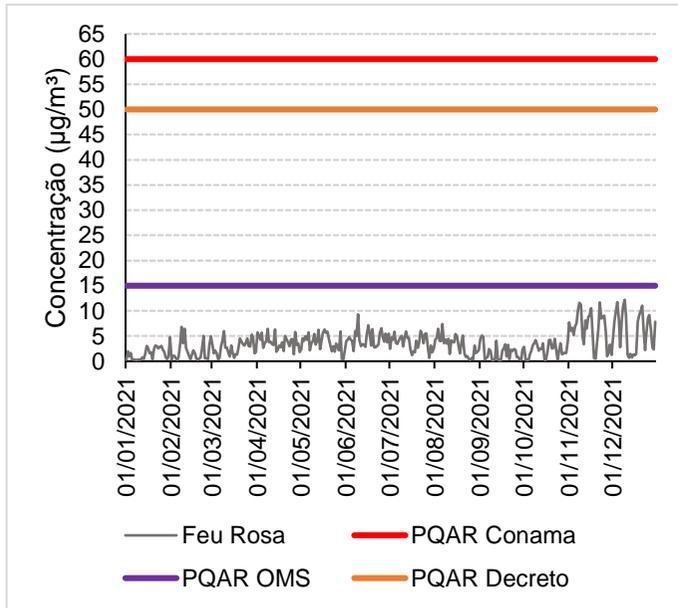


Figura 5.25: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5} – Barcelona.

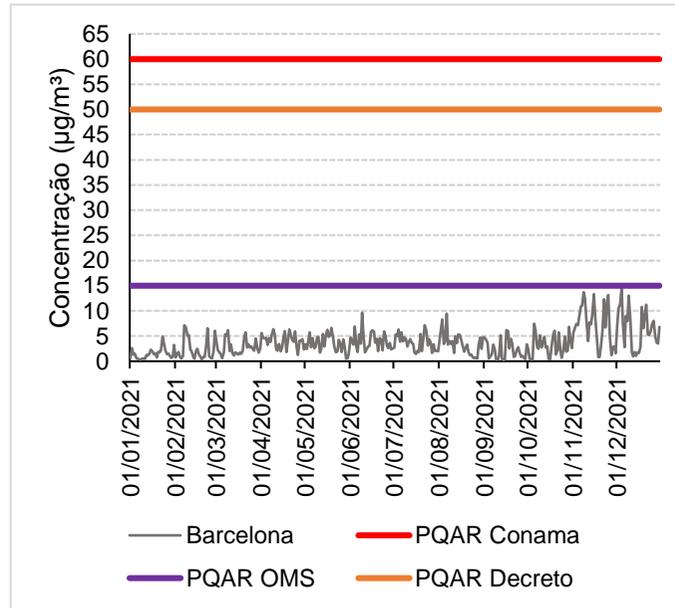
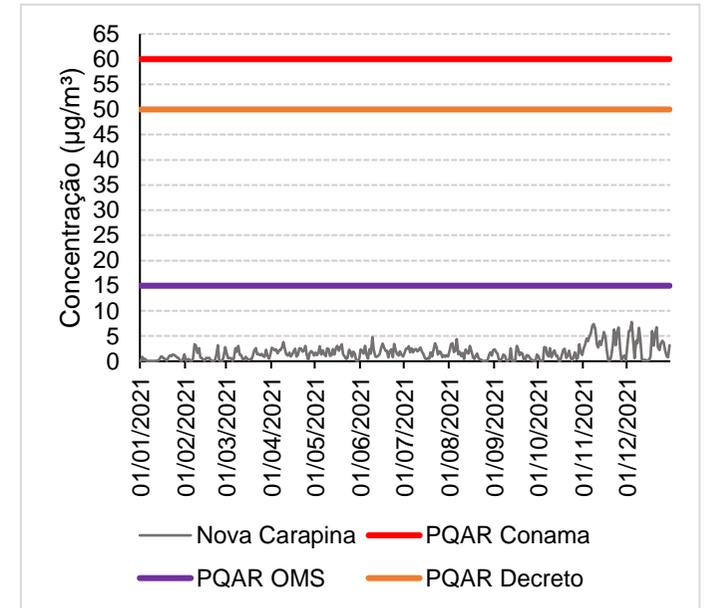


Figura 5.26: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5} – Nova Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.27: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5} – Jardim Tropical.

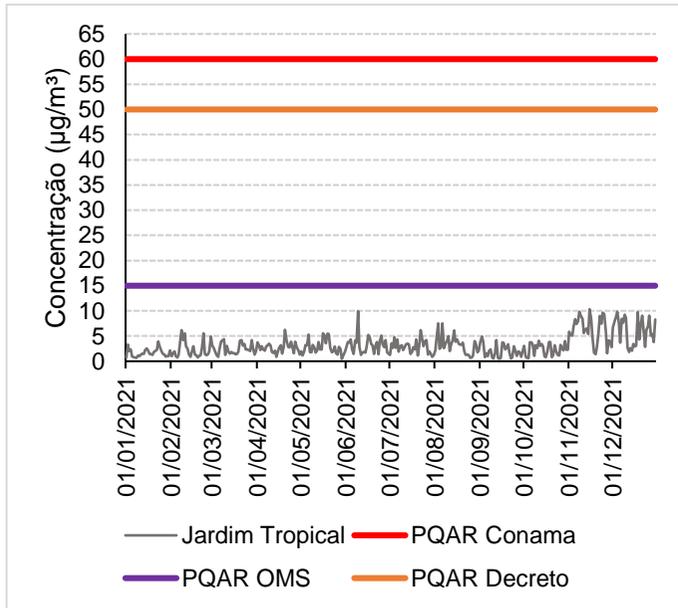


Figura 5.28: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5} – Planalto Serrano.

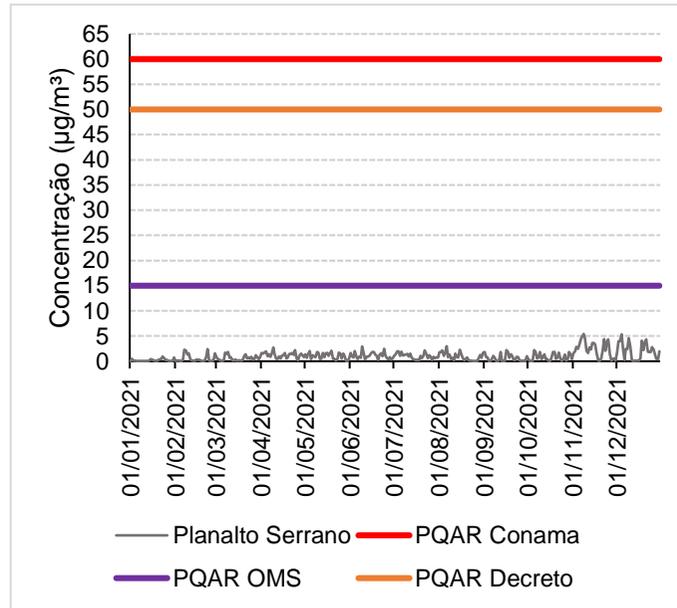
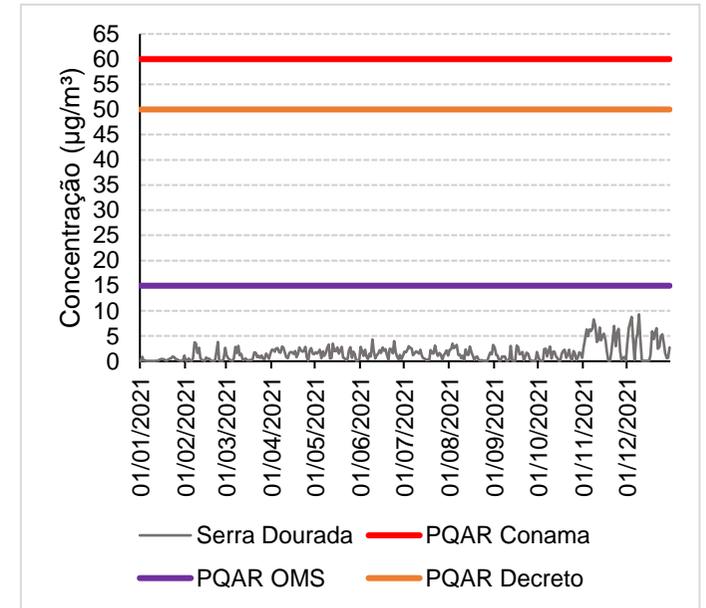


Figura 5.29: Evolução das Médias de 24 horas de MP_{2,5} – Serra Dourada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

É possível observar nas figuras que em nenhum dos pontos estudados, o padrão estabelecido pela Resolução CONAMA n° 491/2018 foi ultrapassado, apesar das Estações Laranjeiras e Cidade Continental apresentarem concentrações mais próximas do limite.

Em relação ao PQAR estadual ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foram verificadas ultrapassagens apenas na Estação Laranjeiras, sendo $53,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o maior valor simulado no ponto, que representa 108% do padrão em questão.

Por fim, a diretriz mais restritiva estabelecida pela OMS ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi violada apenas nas 3 estações de qualidade do ar, que como citado anteriormente tem maior influência das emissões advindas do Porto de Tubarão.

A seguir (**Tabela 5.3**) são exibidas as médias anuais de material particulado inferior a $2,5 \mu\text{m}$ nos pontos estudados. Em todos eles, o PQAr estabelecido pela Resolução CONAMA N° 491/2018 e DECRETO N° 3463-R/2013 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) não foram ultrapassados. Entretanto pela OMS estabelecer um padrão mais restritivo ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), nota-se a violação do valor nas estações de monitoramento da qualidade do ar.

Tabela 5.3: Média anual das concentrações simuladas de $\text{MP}_{2,5}$.

Ponto	Média Anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Centro Serra	0,89
Jacaraípe	1,83
Nova Almeida	2,11
Feu Rosa	3,48
Barcelona	3,69
Nova Carapina	1,67
Jardim Tropical	3,15
Planalto Serrano	1,05
Serra Dourada	1,64
Estação Laranjeiras	16,47
Estação Cidade Continental	10,12
Estação Carapina	5,38

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.2.3. Monóxido de Carbono

Tanto a Resolução CONAMA Nº 491/2018 quanto Decreto Nº 3463-R/2013 estabelecem o padrão de qualidade do ar para o monóxido de carbono para a média móvel de 8 horas de 10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Entretanto a OMS estabelece a diretriz para o poluente para um média de 24 horas com o valor de 4.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A **Figura 5.30** a **Figura 5.41** apresentam as concentrações simuladas em cada ponto receptor definido no estudo e sua comparação com o PQAR nacional e estadual. Enquanto a **Figura 5.42** a **Figura 5.53** exibem a comparação dos resultados com a diretriz estabelecida pela OMS.

Figura 5.30: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Estação Laranjeiras.

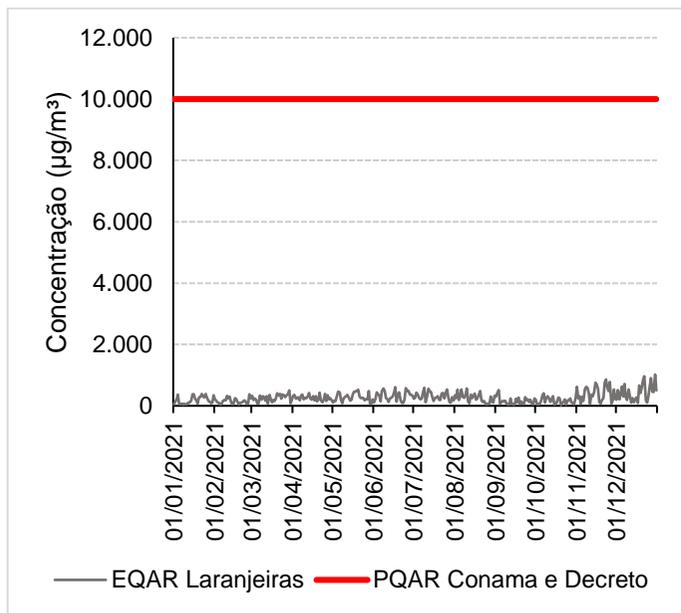


Figura 5.31: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Estação Cidade Continental.

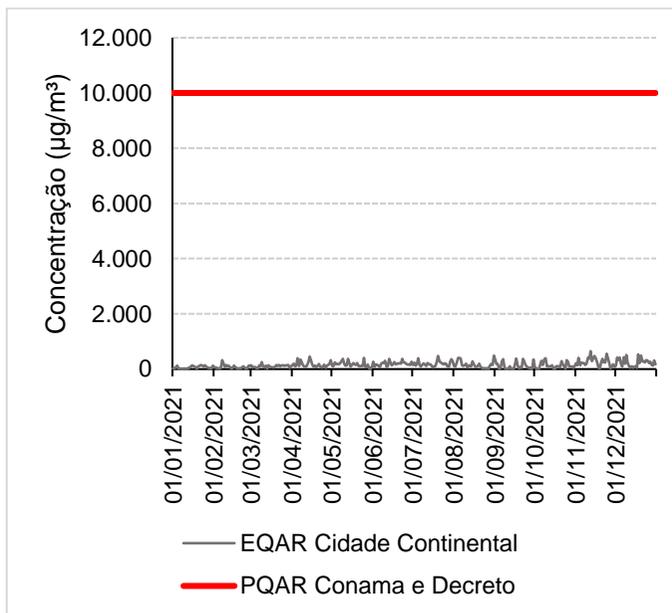
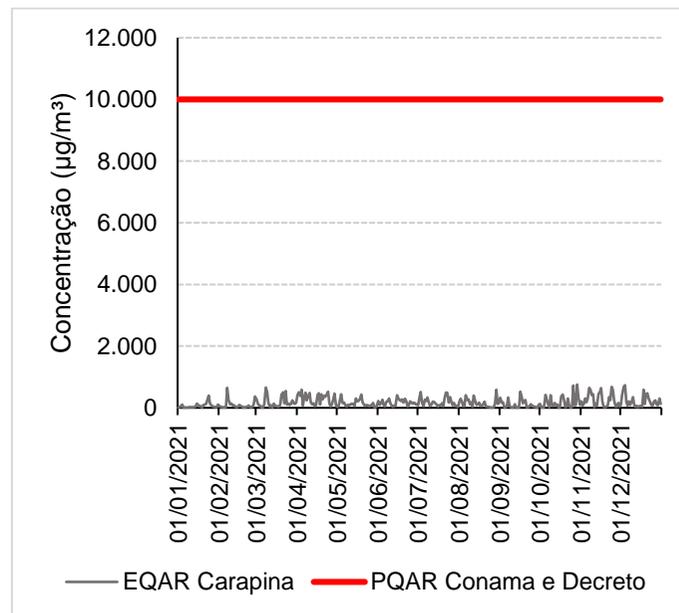


Figura 5.32: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Estação Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.33: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Centro Serra.

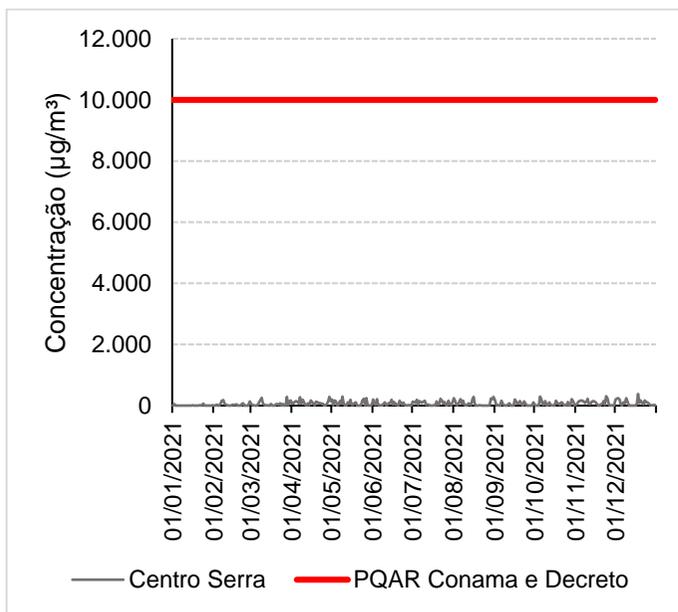


Figura 5.34: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Jacaraípe.

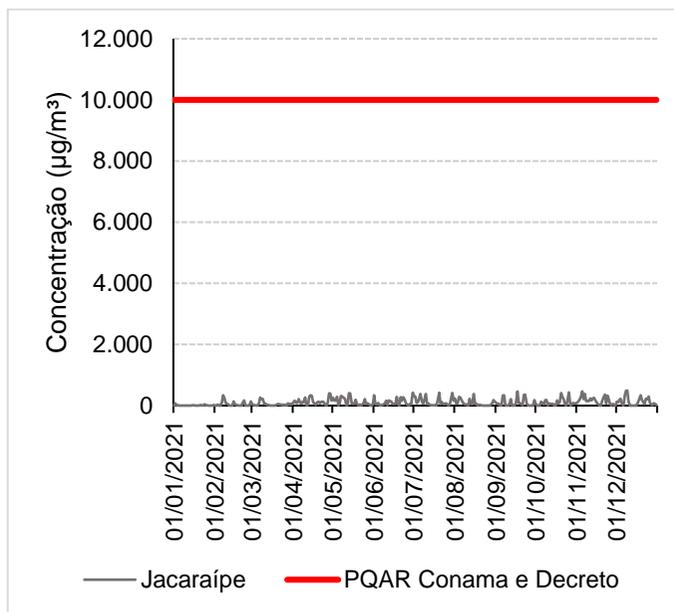
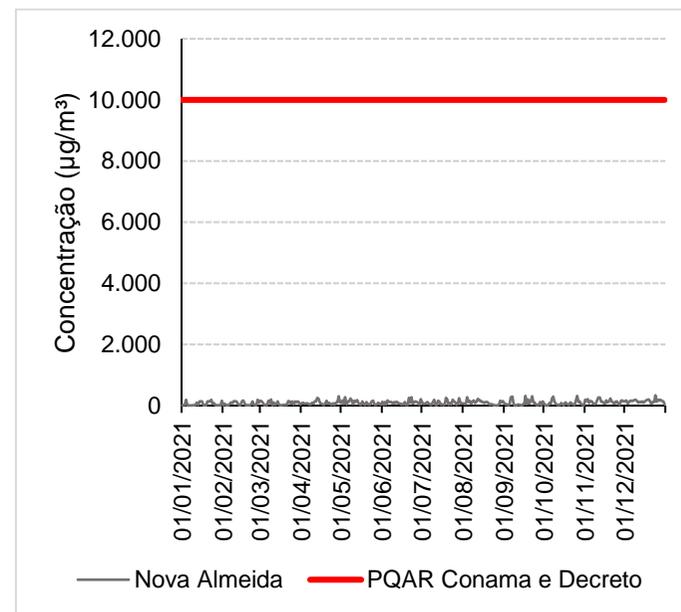


Figura 5.35: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Nova Almeida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.36: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Feu Rosa.

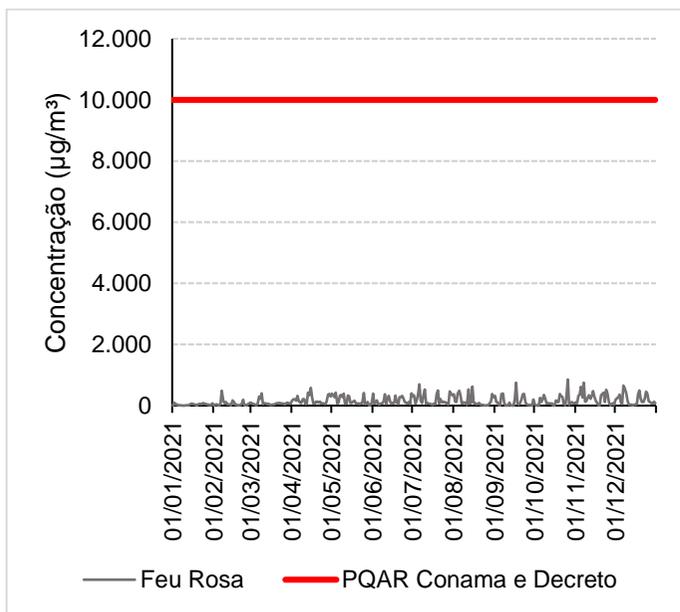


Figura 5.37: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Barcelona.

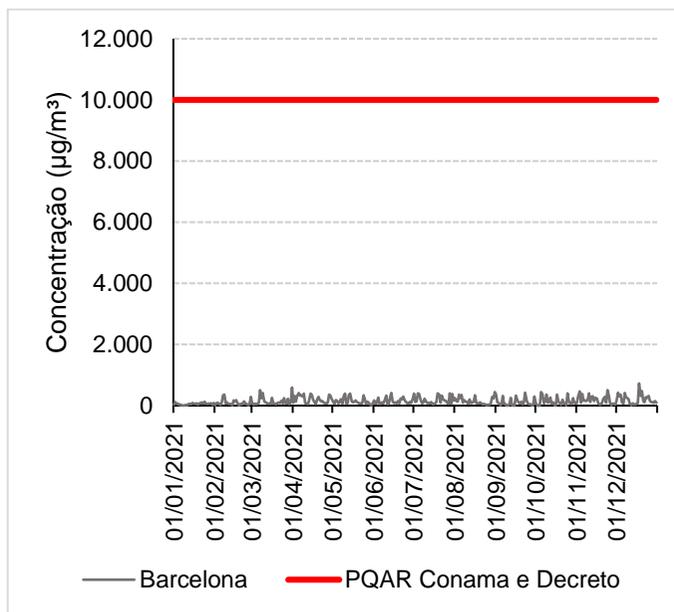
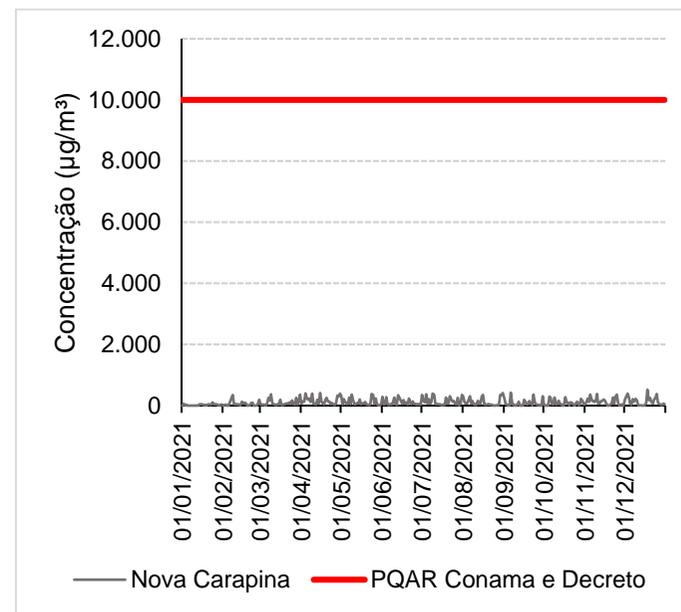


Figura 5.38: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Nova Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.39: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Jardim Tropical.

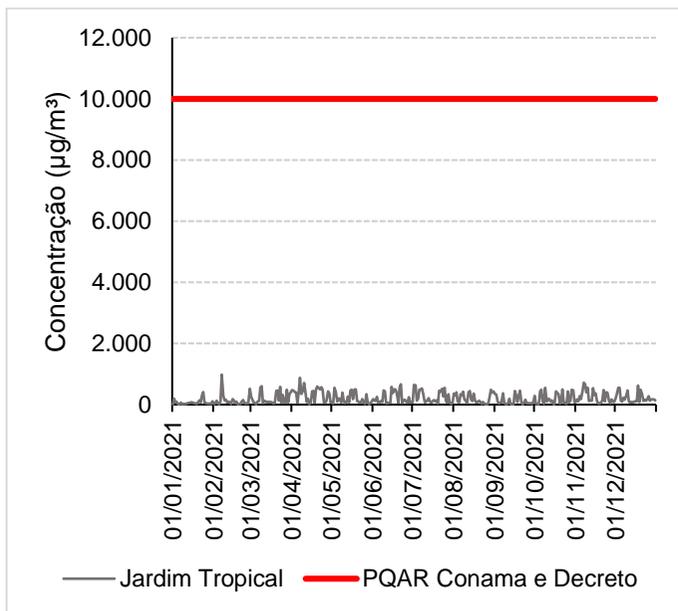


Figura 5.40: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Planalto Serrano.

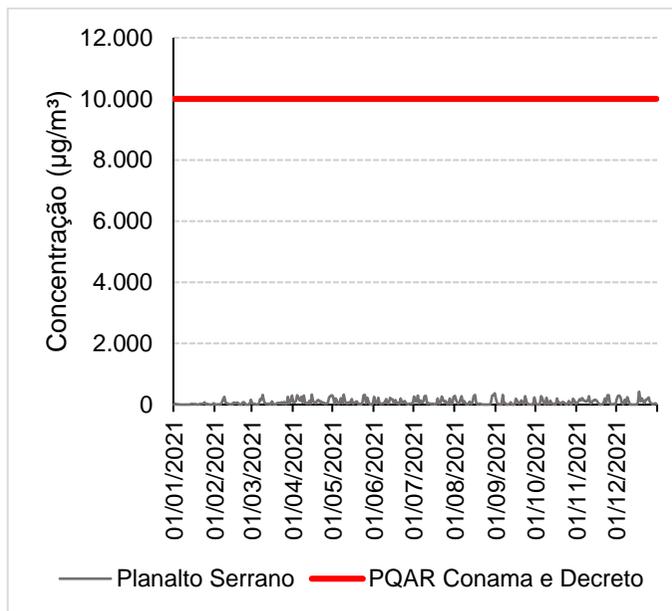
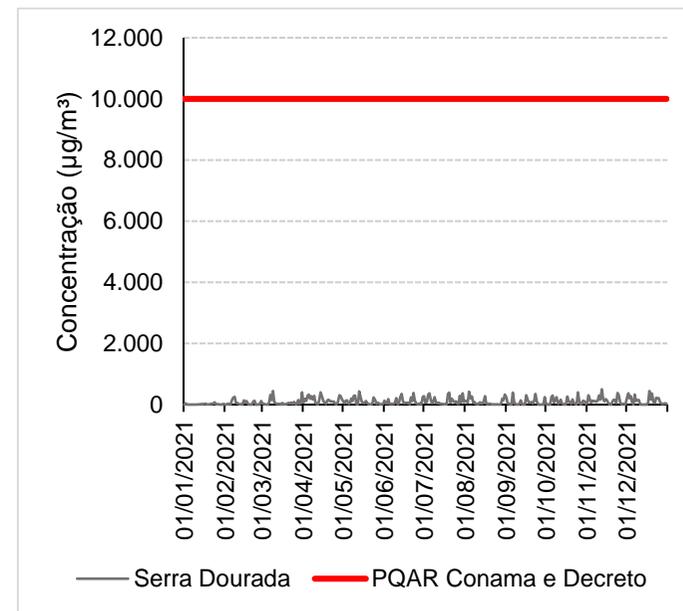


Figura 5.41: Evolução das Médias de 8 horas de CO – Serra Dourada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.42: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Estação Laranjeiras.

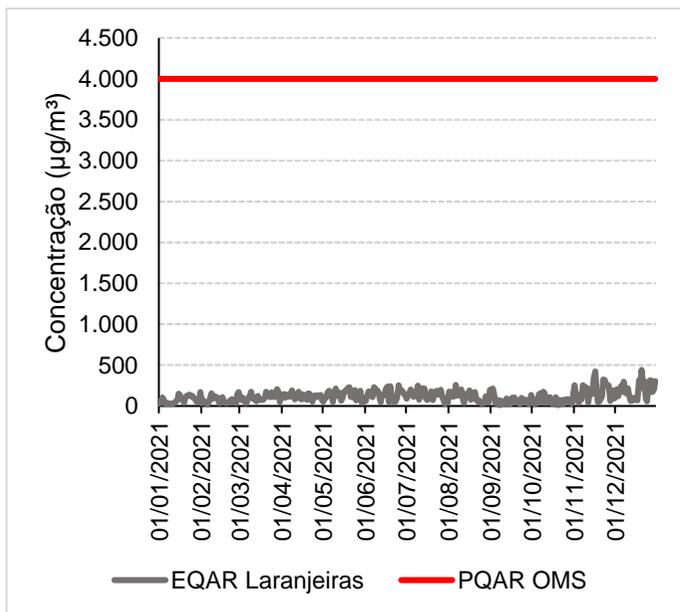


Figura 5.43: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Estação Cidade Continental.

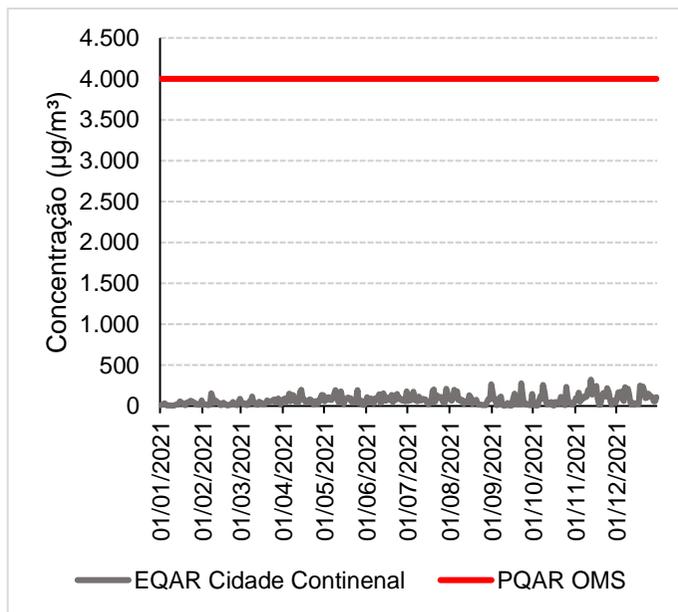
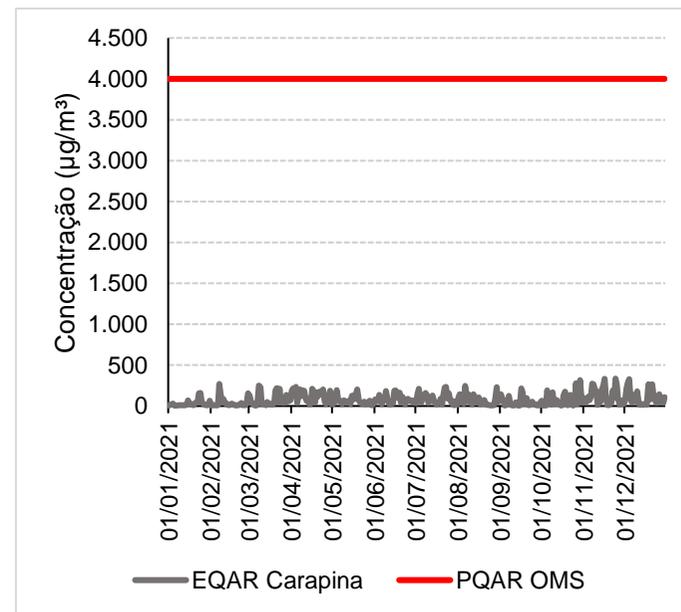


Figura 5.44: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Estação Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.45: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Centro Serra.

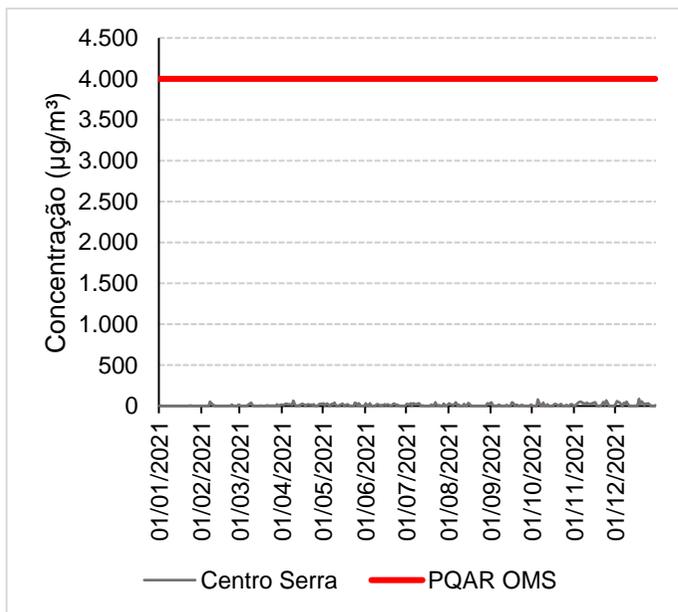


Figura 5.46: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Jacaraípe.

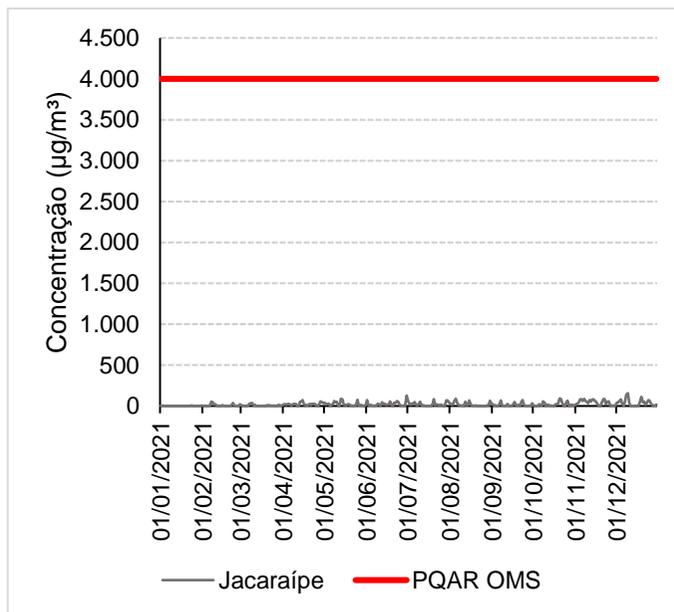
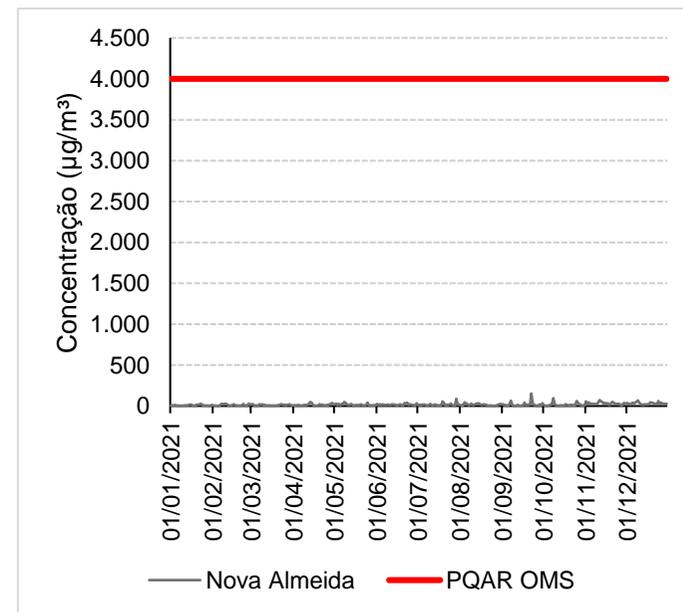


Figura 5.47: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Nova Almeida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.48: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Feu Rosa.

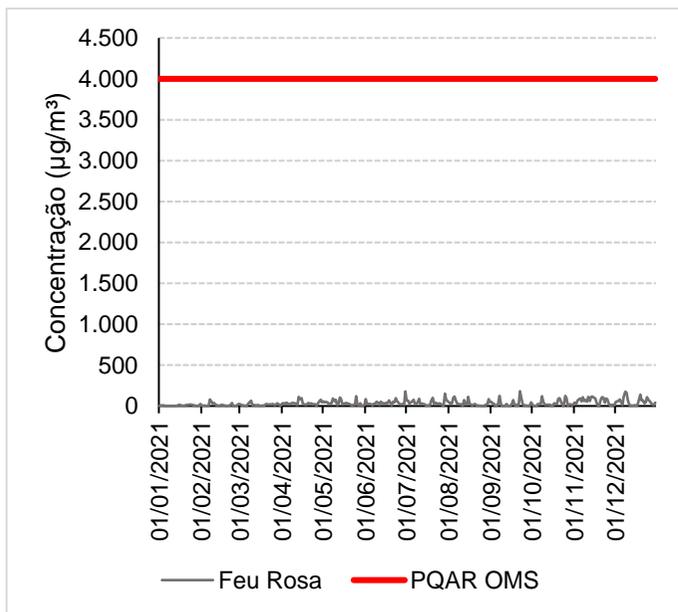


Figura 5.49: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Barcelona.

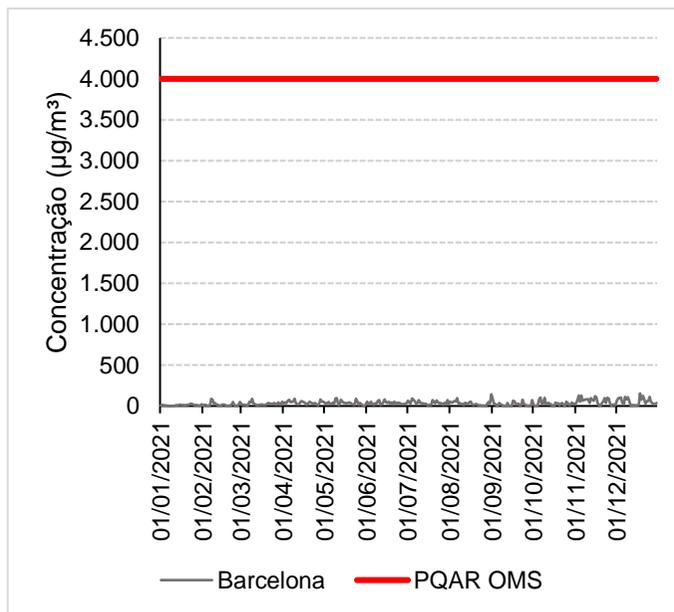
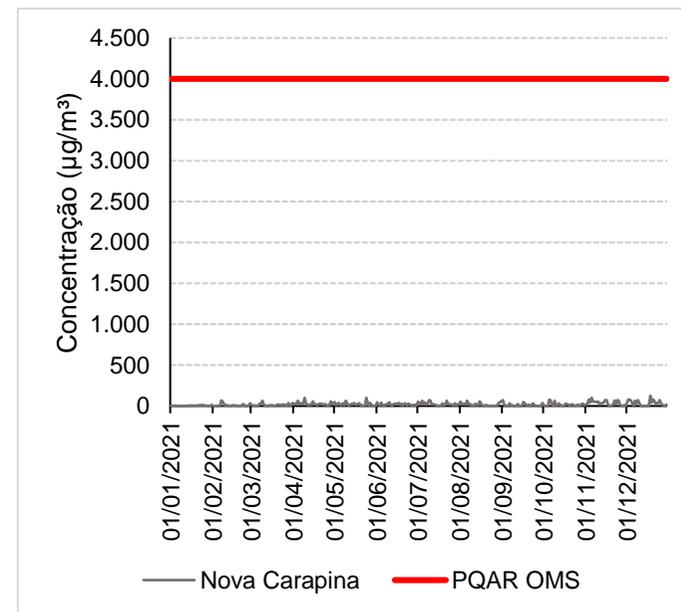


Figura 5.50: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Nova Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.51: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Jardim Tropical

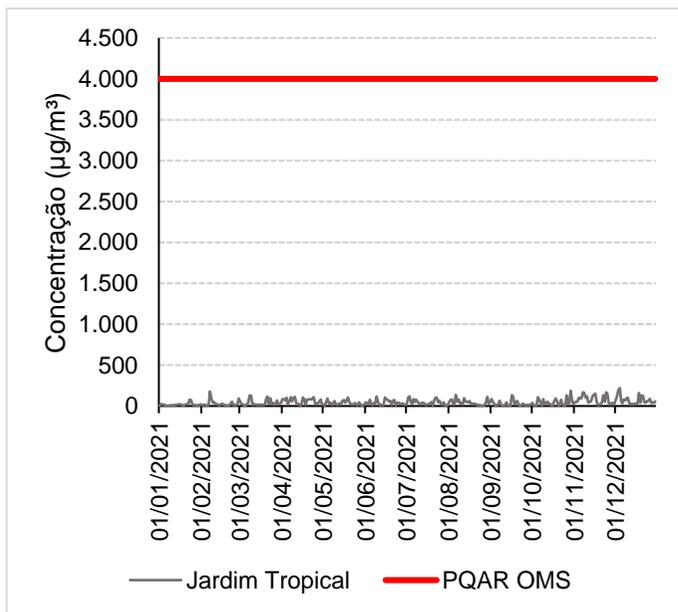


Figura 5.52: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Planalto Serrano.

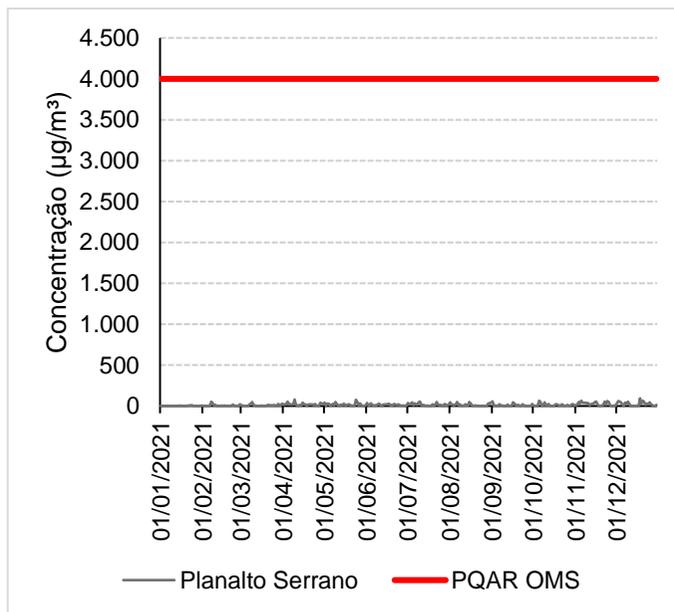
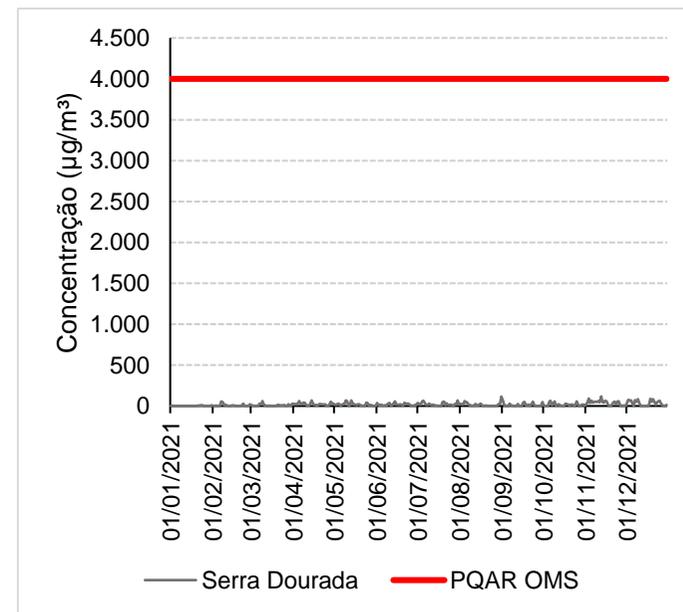


Figura 5.53: Evolução das Médias de 24 horas de CO – Serra Dourada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Não foram observadas ultrapassagens do padrão de qualidade do ar para CO nos pontos receptores discretos em relação ao limite nacional e estadual. A maior concentração entre os pontos receptores discretos foi observada na Estação Cidade Continental (1.690,69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), que representa 17% do padrão.

Quanto ao limite recomendado pela OMS para o monóxido de carbono (4.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), nota-se que ele é mais restritivo quando comparado com a Resolução CONAMA e Decreto N° 3463-R/2013. Entretanto, não foram observadas ultrapassagens em todos os pontos estudados.

5.2.4. Dióxido de Enxofre

Nesta seção são apresentadas as concentrações simuladas de Dióxido de Enxofre (SO₂) para o curto período (24 horas) e longo período (anual). Ademais, os resultados modelados são comparados aos padrões de qualidade do ar dispostos na Resolução CONAMA Nº 491/2018, Decreto Estadual Nº 3463-R/2013 e Guia da Qualidade do Ar da Organização Mundial da Saúde.

A seguir (**Figura 5.54 a Figura 5.65**), são apresentadas as comparações das concentrações simuladas com os padrões de qualidade do ar em cada ponto.

Figura 5.54: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Estação Laranjeiras.

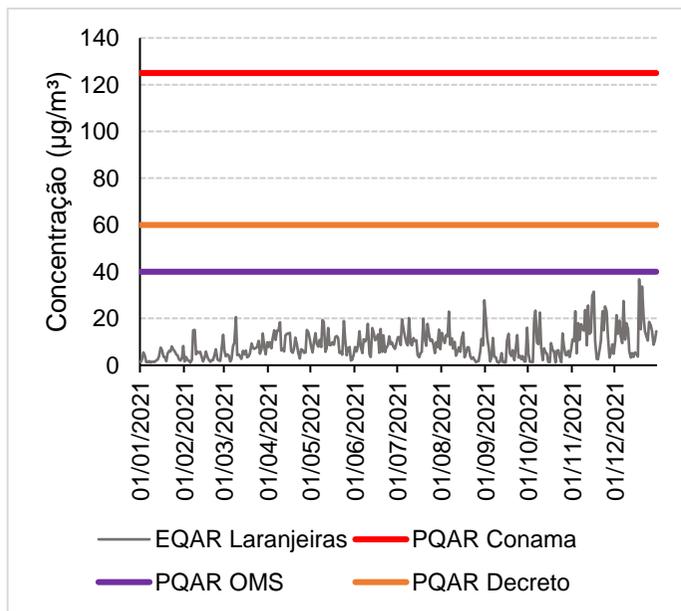


Figura 5.55: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Estação Cidade Continental.

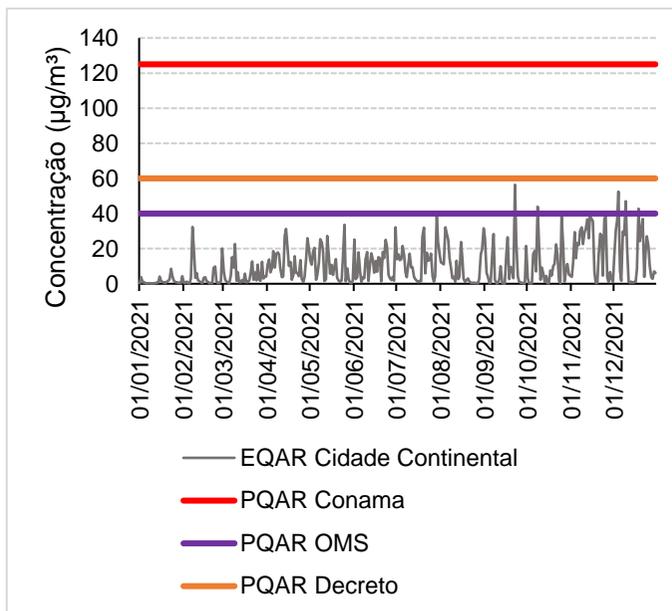
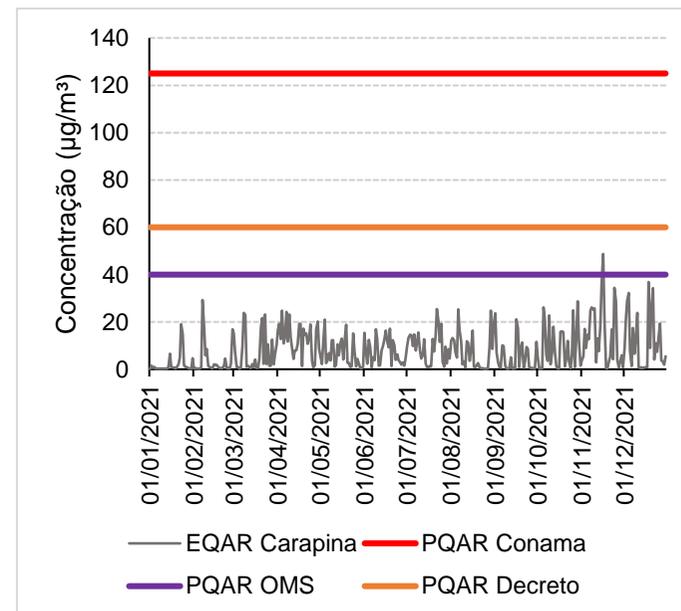


Figura 5.56: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Estação Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.57: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Centro Serra.

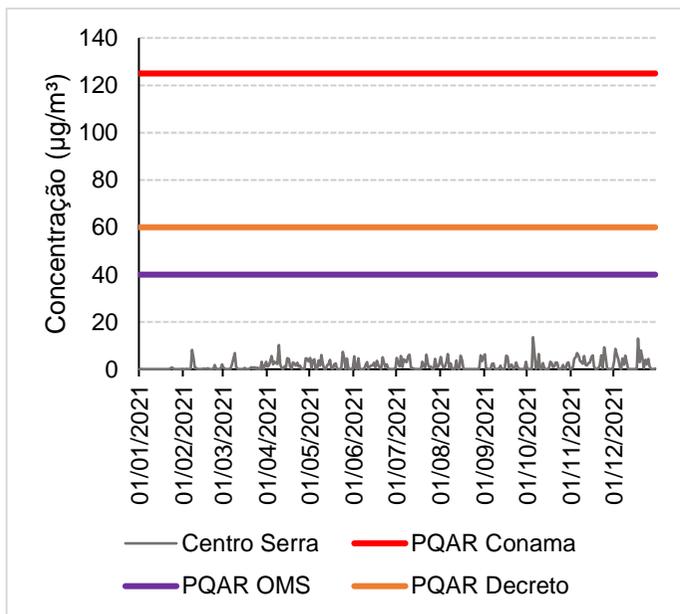


Figura 5.58: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Jacaraípe.

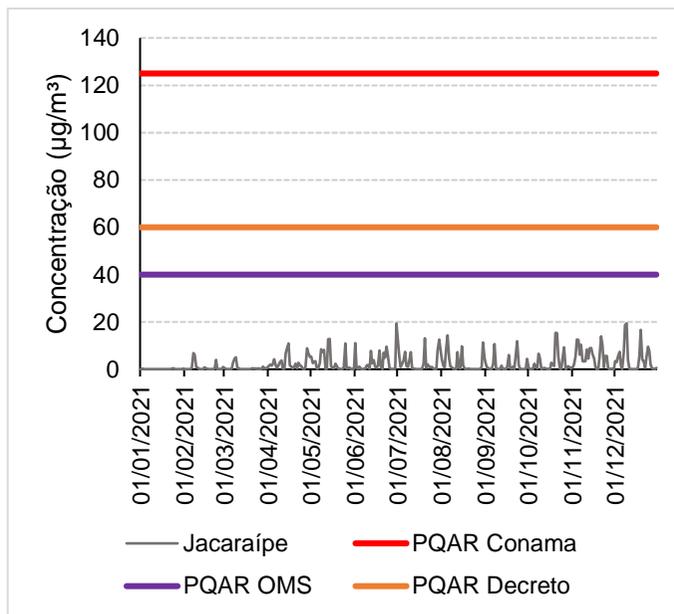
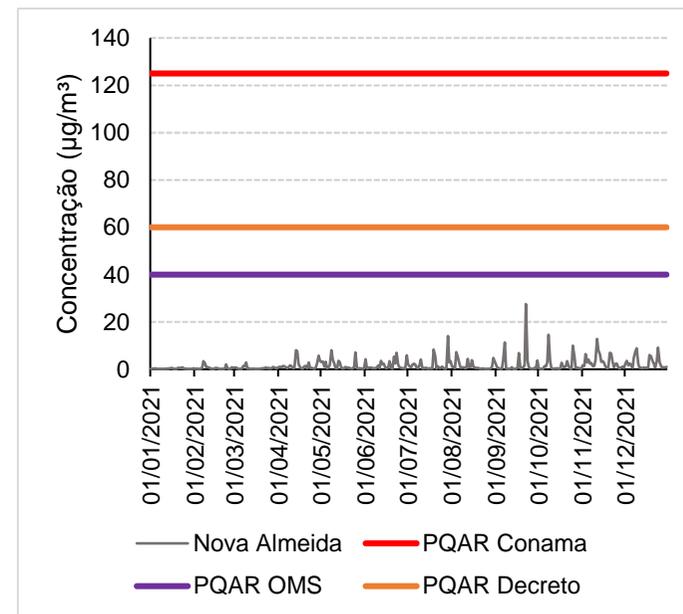


Figura 5.59: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Nova Almeida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.60: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Feu Rosa.

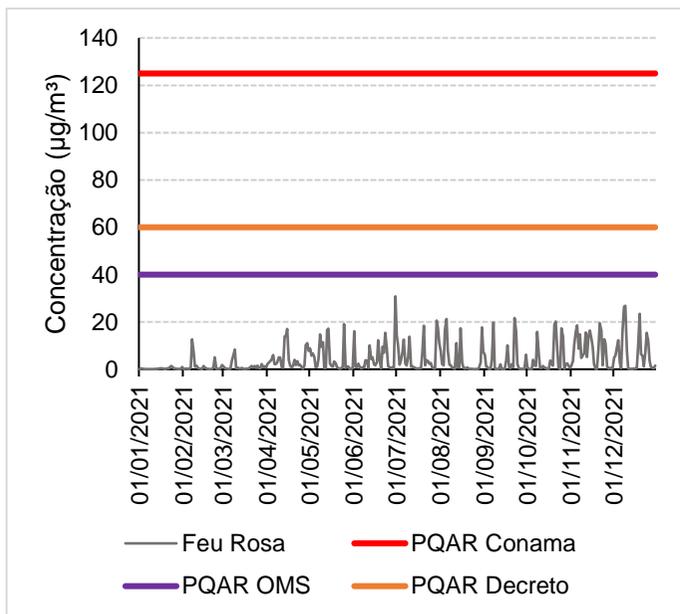


Figura 5.61: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Barcelona.

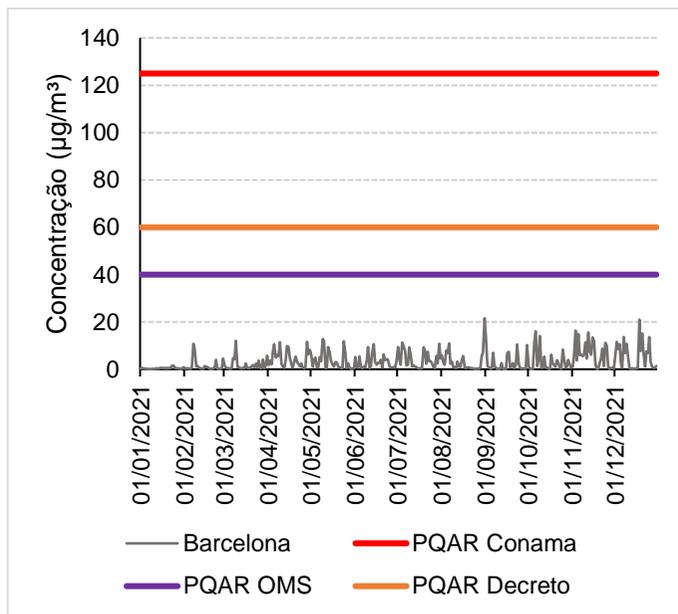
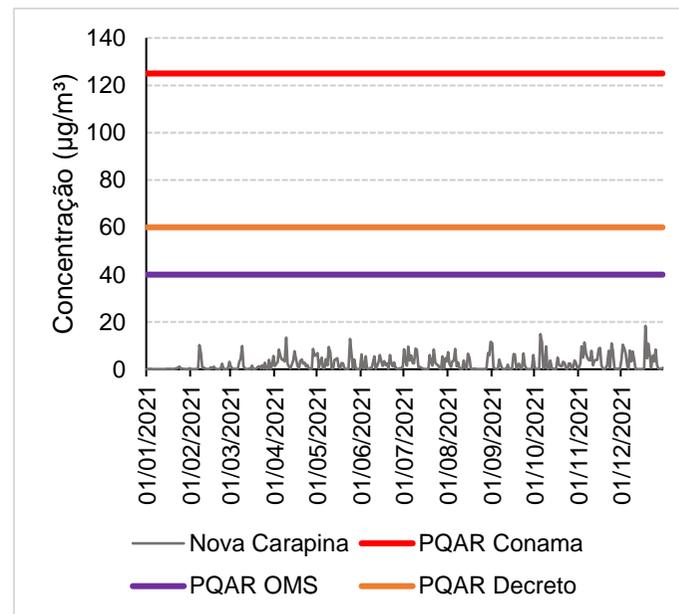


Figura 5.62: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Nova Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.63: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Jardim Tropical.

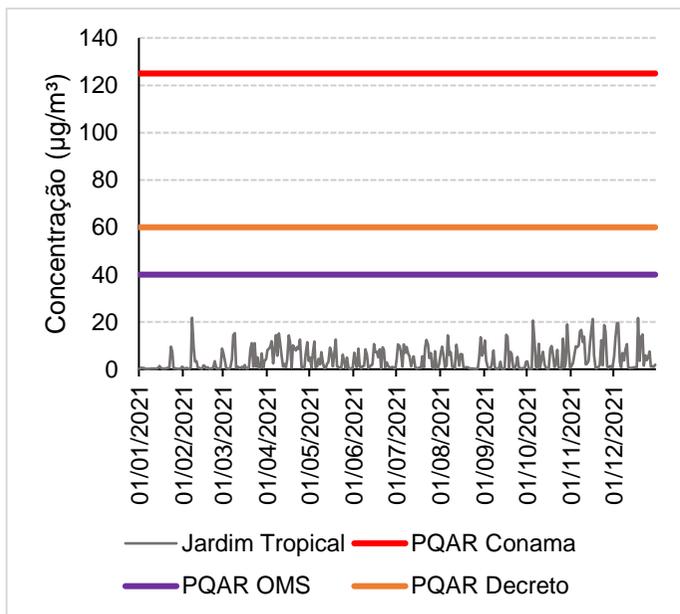


Figura 5.64: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Planalto Serrano.

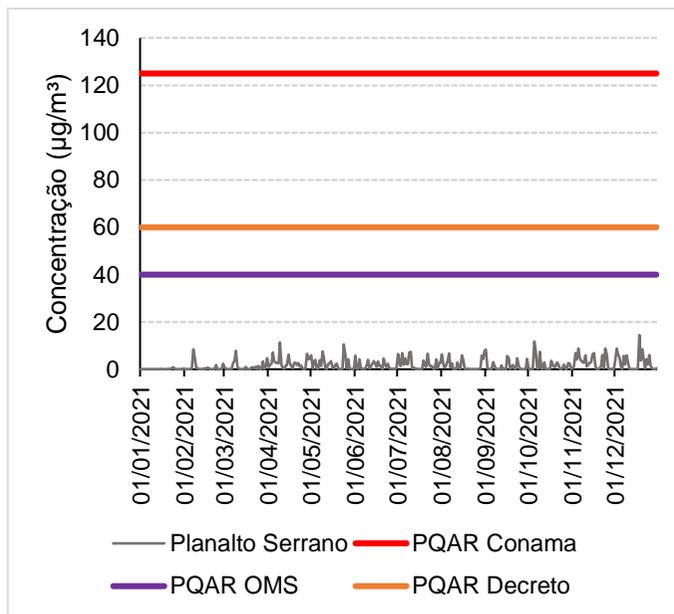
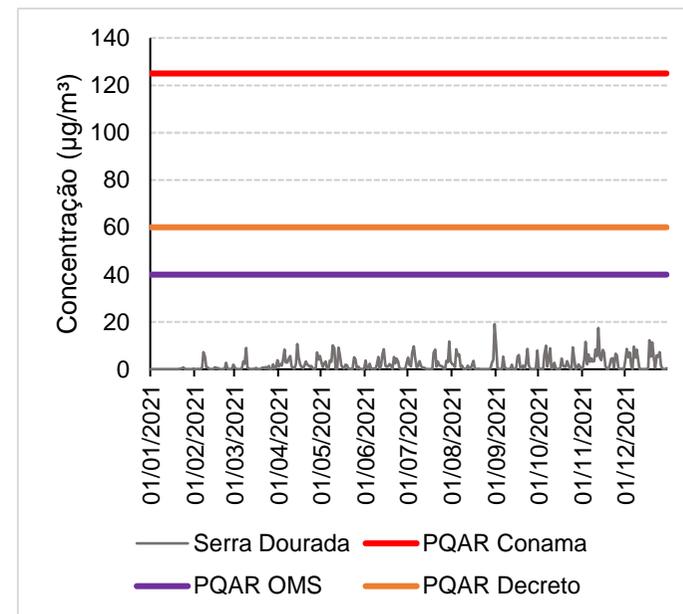


Figura 5.65: Evolução das Médias de 24 horas de SO₂ – Serra Dourada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Constata-se que em nenhum dos pontos receptores o PQAR disposto na CONAMA foi violado. Além do que, não foram observadas ultrapassagens nos PRD em relação ao limite do decreto estadual. Entretanto, ao comparar os valores com a diretriz da OMS foram verificadas 5 ultrapassagens na Estação Cidade Continental e 1 ultrapassagem na Estação Carapina.

Na tabela a seguir (**Tabela 5.4**), é possível verificar as médias anuais de SO₂ simuladas nos pontos do presente trabalho. Quando comparadas com os limites de longo período (anual) dispostos na Resolução CONAMA N° 491/2018 (40 µg/m³) e Decreto Estadual N° 3463-R/2013 (40 µg/m³) verifica-se que os valores simulados se mantiveram inferiores. Quanto a OMS, não é recomendado um padrão de longo período para este poluente.

Tabela 5.4: Média anual das concentrações simuladas de SO₂.

Ponto	Média Anual (µg/m ³)
Centro Serra	1,60
Jacaraípe	2,40
Nova Almeida	1,62
Feu Rosa	4,04
Barcelona	3,26
Nova Carapina	2,34
Jardim Tropical	4,19
Planalto Serrano	1,77
Serra Dourada	2,09
Estação Laranjeiras	8,63
Estação Cidade Continental	10,14
Estação Carapina	8,01

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.2.5. Óxidos de Nitrogênio

A seguir são analisados e discutidos os resultados de concentrações simuladas para os óxidos de nitrogênio.

A Resolução CONAMA, o Decreto Estadual e a OMS estabelecem padrões de qualidade do ar para a média de 1 hora, sendo eles $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Assim, a **Figura 5.66** a **Figura 5.77** exibem a comparação gráfica dos resultados simulados com estes padrões em cada um dos pontos estudados.

Figura 5.66: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Estação Laranjeiras.

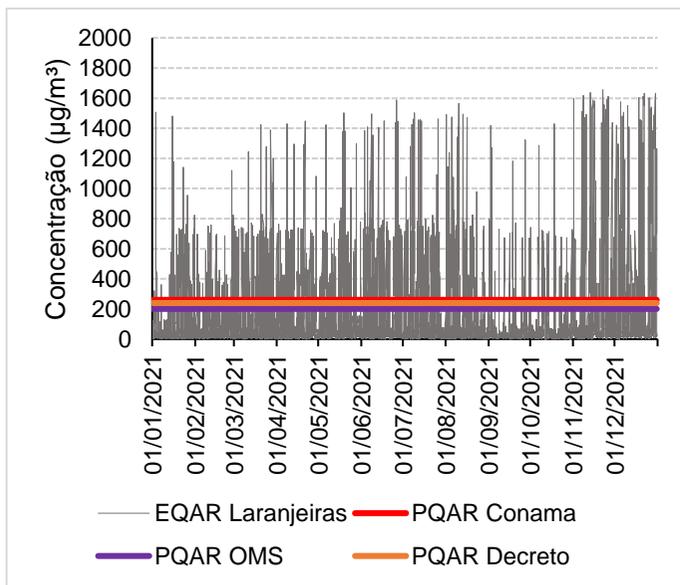


Figura 5.67: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Estação Cidade Continental.

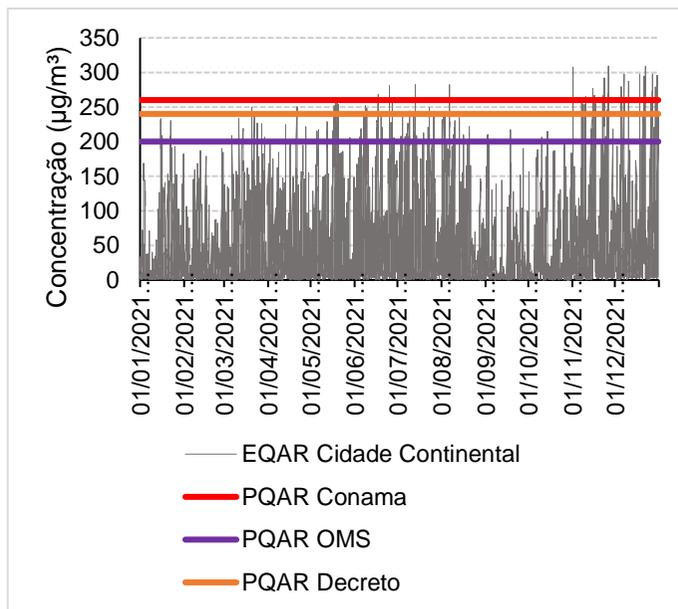
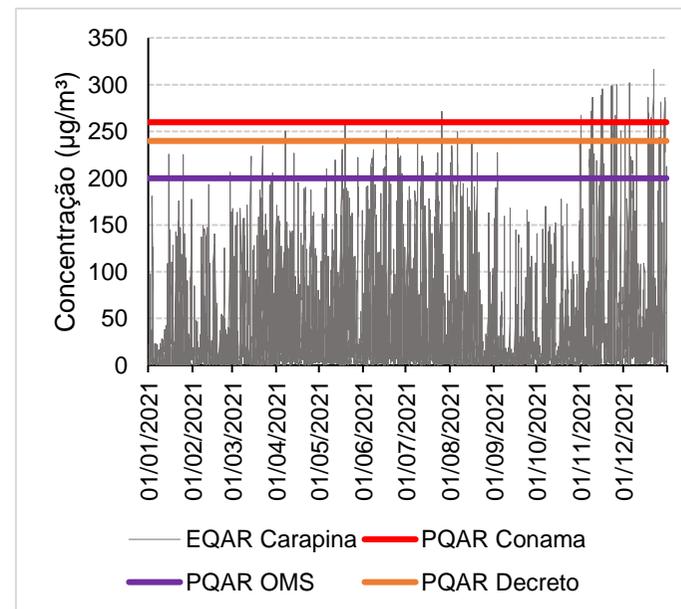


Figura 5.68: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Estação Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.69: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Centro Serra.

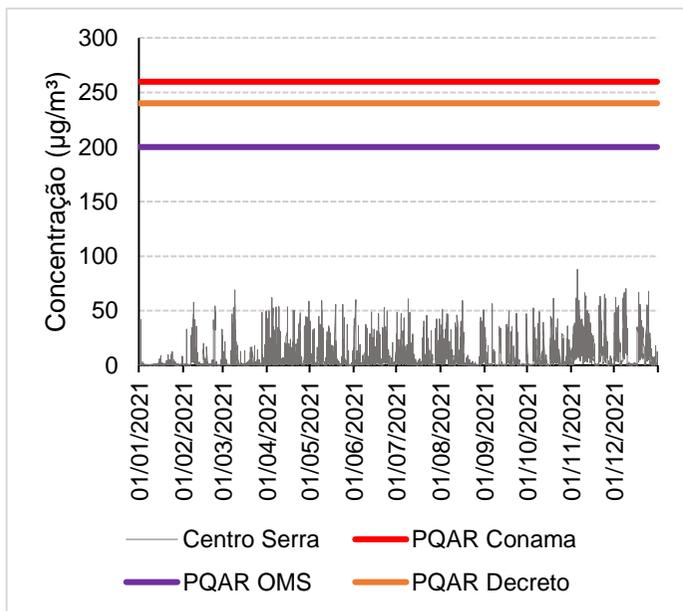


Figura 5.70: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Jacaraípe.

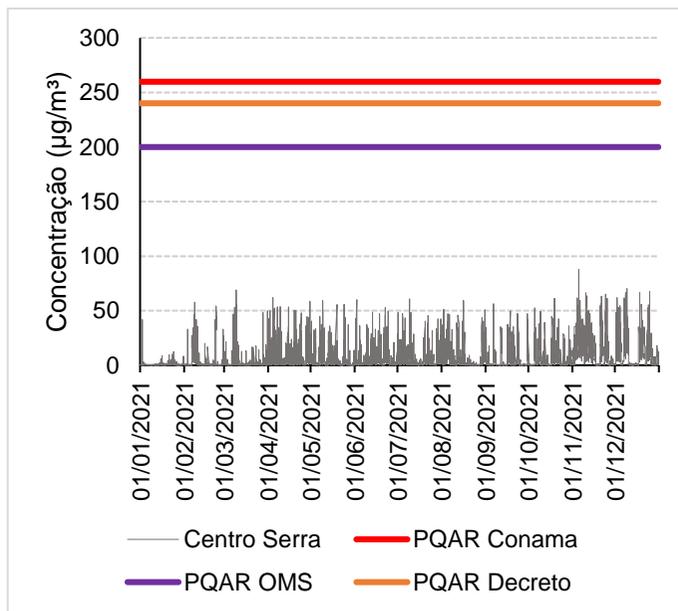
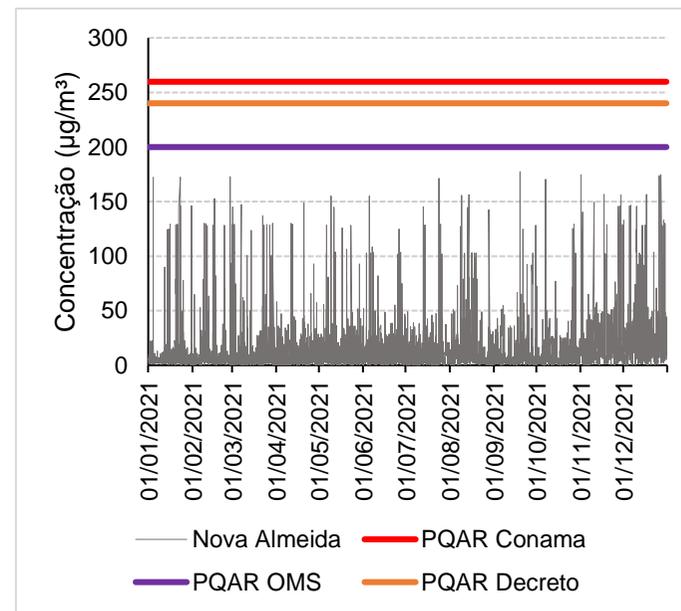


Figura 5.71: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Nova Almeida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.72: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Feu Rosa.

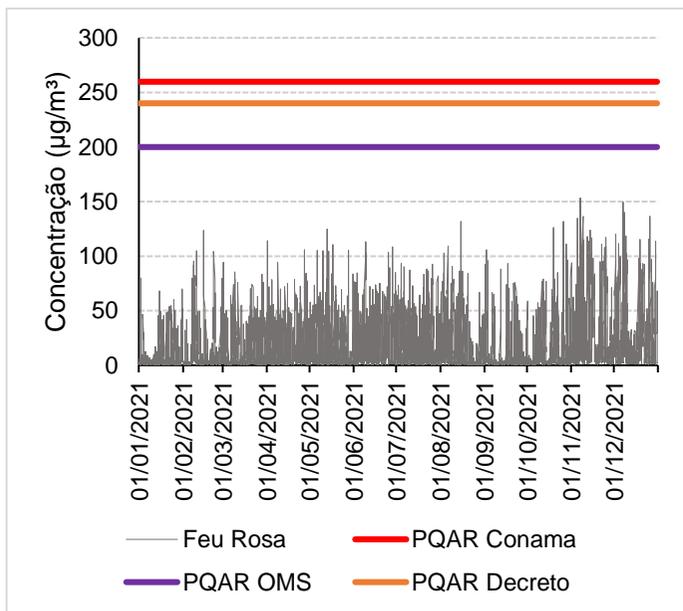


Figura 5.73: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Barcelona.

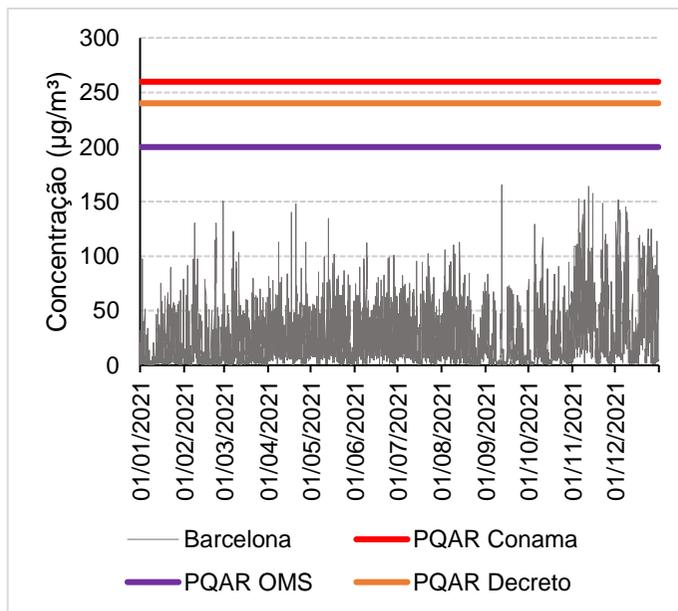
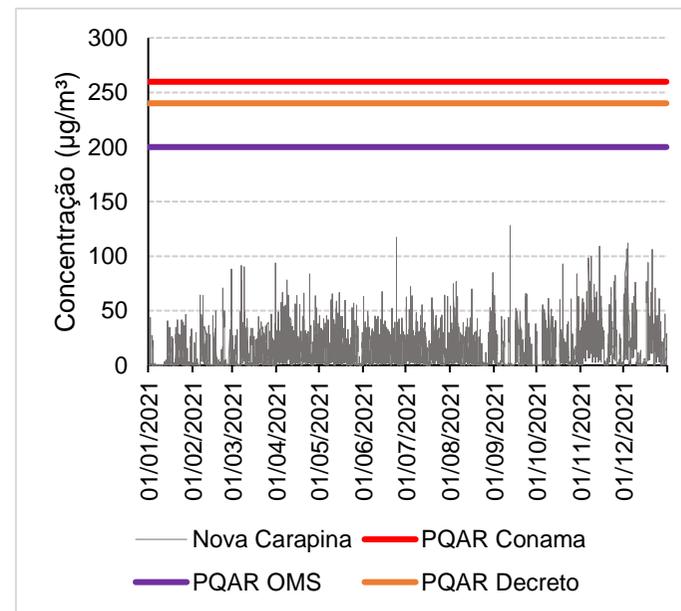


Figura 5.74: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Nova Carapina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 5.75: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Jardim Tropical.

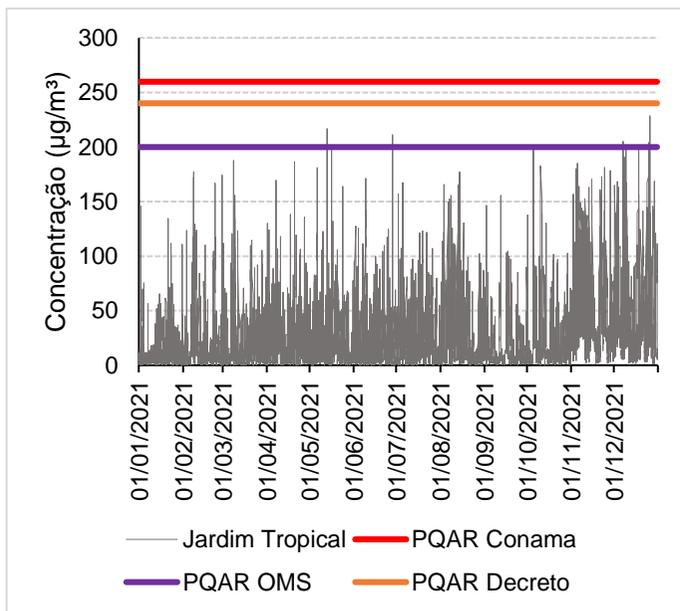


Figura 5.76: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Planalto Serrano.

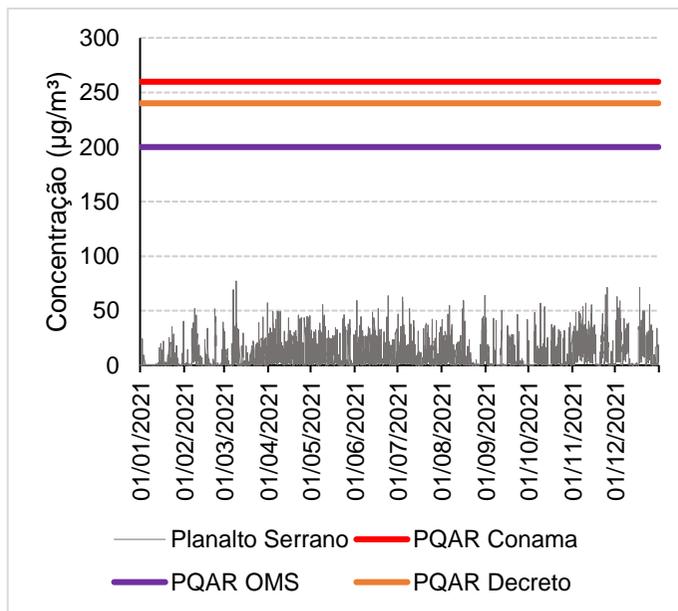
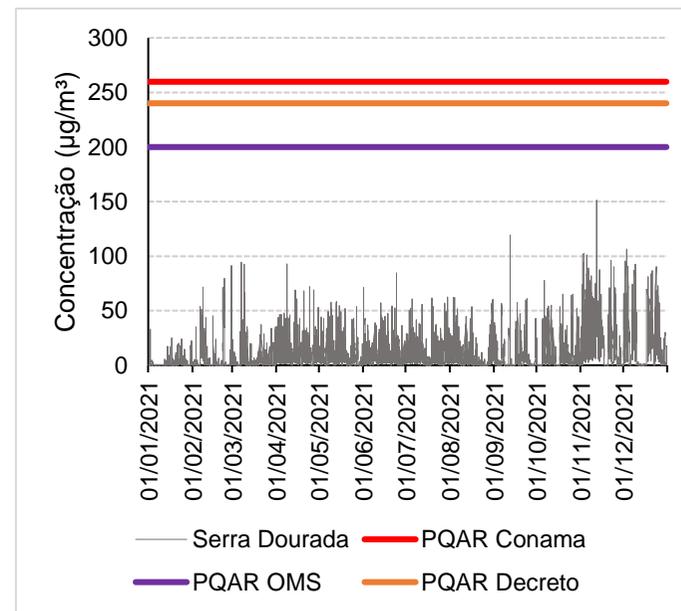


Figura 5.77: Evolução das Médias de 1 hora de NO_x – Serra Dourada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Em relação ao padrão nacional e estadual, nota-se ultrapassagens apenas nas 3 estações de qualidade do ar. Sendo o maior valor simulado ($1656,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) na Estação Laranjeiras. Além disso, observa-se em alguns outros pontos concentrações simuladas mais próximas dos limites. Quanto ao padrão estabelecido pela OMS, há a ocorrência de ultrapassagens nas EMQAr e no Bairro Jardim Tropical.

Essas concentrações mais altas podem ser explicadas devido ao fato que, na atmosfera real, os óxidos de nitrogênio são consumidos ao longo do dia, devido às reações fotoquímicas que geram poluentes secundários. Porém na configuração empregada o modelo o consumo destes óxidos não é tratado em seu algoritmo, podendo provocar concentrações simuladas superiores as que de fato ocorrem na atmosfera da região de estudo.

A tabela abaixo (**Tabela 5.5**) exhibe concentrações médias anuais simuladas de NO_x . O padrão de qualidade do ar anual estabelecido pela legislação nacional de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ é violado apenas na Estação Laranjeiras, como é possível verificar na **Tabela 5.5**. Analogamente, o limite estadual ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi ultrapassado apenas na mesma estação. Por fim, dos 12 pontos estudados é constatado que 9 pontos ultrapassaram o valor do limite estabelecido pela OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabela 5.5: Média anual das concentrações simuladas de NO_x .

Ponto	Média Anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Centro Serra	6,37
Jacaraípe	11,50
Nova Almeida	12,32
Feu Rosa	17,32
Barcelona	21,31
Nova Carapina	10,80
Jardim Tropical	25,48
Planalto Serrano	6,99
Serra Dourada	9,66
Estação Laranjeiras	132,08
Estação Cidade Continental	38,10
Estação Carapina	34,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

6. CONCLUSÕES

O presente estudo consiste em uma análise da qualidade do ar no município da Serra a partir de modelagem matemática da dispersão atmosférica. Para isso foi utilizado o modelo California Puff Model (CALPUFF) e os dados do Inventário de Emissões Atmosférica da Região da Grande Vitória de 2015 como dados de entrada. Estes resultados foram analisados e comparados com os padrões de qualidade do ar Resolução CONAMA N° 491/2018, DECRETO N° 3463-R/2013 e Diretrizes da Organização Mundial da Saúde.

Além disso, com o objetivo de verificar a correspondência entre os dados simulados e as concentrações medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar localizadas na Serra, foram analisados estatisticamente os resultados modelados.

Os resultados obtidos no modelo demonstram que as concentrações simuladas nas estações de monitoramento da qualidade do ar (Laranjeiras, Cidade Continental e Carapina) foram superiores as concentrações dos demais pontos estudados. Sendo assim, observa-se um número maior de ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar nacionais e estaduais, principalmente na Estação Laranjeiras. Contudo, é importante ressaltar que as estações estão sobre maior influência das emissões advindas do Porto de Tubarão.

É constatado que as diretrizes de qualidade do ar recomendadas pela Organização Mundial de Saúde são mais restritivas do que os padrões nacionais e estaduais. Conseqüentemente, o número de violações das concentrações simuladas foram substancialmente maiores quando comparada com os padrões nacionais e estaduais.

Verifica-se que o NO_x é o poluente que apresentou maior número de ultrapassagem em relação aos limites comparados. Nas três estações de monitoramento, ocorreram violações dos padrões da CONAMA, do decreto e das diretrizes recomendadas pela OMS. Além disso, nota-se nos outros pontos concentrações mais próximas dos limites. Contudo, na atmosfera real, os óxidos de nitrogênio são consumidos ao longo do dia, por reações fotoquímicas. Enquanto na configuração do modelo o consumo destes óxidos não é tratado,

podendo provocar concentrações simuladas superiores as que de fato ocorrem na atmosfera da região de estudo.

Apesar do exposto, a maioria dos pontos receptores discretos considerados não apresentaram nenhuma ultrapassagem dos padrões durante todo o período analisado, em relação aos poluentes estudados.

Quanto a análise estatística feita, constata-se que a simulação de Material Particulado Inferior a 10 μm (MP_{10}) apresentou melhor desempenho em comparação com a dos outros poluentes (NO_x , SO_2 e CO). Assim como, concluiu-se que o CALPUFF superestimou as concentrações de óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre, enquanto subestimou as de monóxido de carbono.

Por fim, recomenda-se para trabalhos futuros: Simulação de outros poluentes, com objetivo de estudar se as concentrações simuladas estão abaixo dos valores indicados na Resolução CONAMA N° 491/2018, DECRETO N° 3463-R/2013 e valores guias da OMS; Simulação com o modelo AERMOD a fim de comparação para entender qual modelo apresenta melhor desempenho para a região de estudo; Avaliação das fontes com maior contribuição da degradação da qualidade do ar na Serra e Elaboração de mosaicos de concentração para melhor entendimento da dispersão atmosférica no município.

7. REFERÊNCIAS

ABDUL-WAHAB, Sabah; FADLALLAH, Sulaiman; AL-RASHDI, Moosa. Evaluation of the impact of ground-level concentrations of SO₂, NO_x, CO, and MP10 emitted from a steel melting plant on Muscat, Oman. **Sustainable cities and society**, v. 38, p. 675-683, 2018.

ABREU, R.L. Espírito Santo Meso Micro Município. **Wikipédia**, 2006. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EspiritoSanto_MesoMicroMunicip.svg>. Acesso em: 02 de março de 2022.

AMOATEY, Patrick et al. Performance of AERMOD and CALPUFF models on SO₂ and NO₂ emissions for future health risk assessment in Tema Metropolis. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 25, n. 3, p. 772-786, 2019.

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

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 3 de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 22 ago 1990.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 491 de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 19 nov 2018.

CALVACANTI, P.M.P.S. **Modelo de gestão da qualidade do ar – abordagem preventiva e corretiva.** 2010. 252 p. Tese (Doutorado em Ciência em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

CANÇADO, José Eduardo Delfini et al. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 32, p. S5-S11, 2006.

CARVALHO, J.C. **Estudo dos processos de transporte e difusão na camada limite planetária utilizando os modelos RAMS e SPRAY: Aplicação ao caso do experimento TRACT.** 1999. 184 p. Tese doutorado - IAG-USP, São Paulo.

CASTRO, A. H. S.; ARAÚJO, R. S.; SILVA, G. M. M. Qualidade do ar – parâmetros de controle e efeitos na saúde humana: uma breve revisão. **Holos**, v. 5, p. 107-121, 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DE SÃO PAULO – CETESB. Qualidade do Ar – Poluentes. **CETESB**, s.d. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>> Acesso em: 08 de fev de 2022.

DRESSER, Alan L.; HUIZER, Robert D. CALPUFF and AERMOD model validation study in the near field: Martins Creek revisited. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 61, n. 6, p. 647-659, 2011.

ECOSOFT, 2019. **INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DA REGIÃO DA GRANDE VITÓRIA ANO BASE – 2015**. <Disponível em: <https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/INVENT%C3%81RIO/Ecosoft_RTC190018_R1.pdf>. Acesso em: 13 de outubro de 2021.

GOMES, Elizabeth Linda Miranda; BIASUTTI, Saulo. **Avaliação do desempenho dos modelos de qualidade do ar AERMOD e CALPUFF na região de Anchieta-ES**. 2012. 146 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

GOMES, João. **Poluição Atmosférica – Um Manual Universitário (2ª edição)**. Porto: Publindústria Edições Técnicas Lta, 2010.

GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Decreto Estadual nº 3463-R de 16/12/013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas**. Diário oficial do Espírito Santo, 17 dez 2013.

HOLMES, Nicholas S.; MORAWSKA, Lidia. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: an overview of different dispersion models available. **Atmospheric environment**, v. 40, n. 30, p. 5902-5928, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Cidades e Estados. **IBGE**, 2021. Disponível em: <ibge.gov.br/cidades-e-estados/es/serra.html>. Acesso em: 02 de março de 2022.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA. **Proposta de Plano de Metas de Redução da Emissão do Complexo de Tubarão**. 2018. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/planos-metas>>. Acesso em: 08 de outubro de 2021.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA. **Relatório da Qualidade do Ar na Grande Vitória. 2020**. Disponível em: <https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/Relatorios_anuais/IEMA_CQAI_Relat%C3%B3rio_Anual_da_Qualidade_do_Ar_2020.pdf> Acesso em: 10 de fev de 2022.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA. Qualidade do Ar – Legislação. **IEMA**. 2021. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/qualidadedoar/legislacao>> Acesso em: 18 de fev de 2022.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA. **Guia da Qualidade de Ar**. Disponível em: <https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/Cartilha/Guia_Qualidade_Ar_ebook.pdf>. Acesso em: 10 de fev de 2022.

INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES – IJSN. Mapas. **IJSN**, 2010. Disponível em: <<http://www.ijsn.es.gov.br/mapas/>>. Acesso em: 02 de março de 2022.

JITTRA, Nattawut; PINTHONG, Nattaporn; THEPANONDH, Sarawut. Performance evaluation of AERMOD and CALPUFF air dispersion models in industrial complex area. **Air, Soil and Water Research**, v. 8, p. ASWR. S32781, 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Qualidade do Ar. **MMA**, s.d. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar.html>>. Acesso em: 08 de fev de 2022.

MONTICELLI, DAVI DE FERREYRO. **Estimating Asthmatic Children Exposure and Dose to Air Pollutants in an Urban Industrialized Area**. 2020. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal Espírito Santo.

MORAES, M.R. **Ferramenta para a previsão de vento e dispersão de poluentes na microescala atmosférica.** 2004. 166 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.

NEDEL, A.S. **Aplicação de um Modelo de Dispersão de Poluentes na Região de Candiota-RS e sua Relação com as Condições Meteorológicas.** 2003. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide.** World Health Organization, 2006.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS), 2021. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and MP₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** Disponível em: < <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 de outubro de 2021.

OSHAN, R, KUMAR, A, MASURAH, A. **Application of the USEPA`s CALPUFF MODEL to an Urban Area.** Department of Civil Engineering, University of Toledo. Toledo. 2006

SEINFELD, Jonh H; PANDIS, Spyros N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.** 2. ed. New Jersey: Jonh Wiley & Sons, 2006. 1225 p. v. 1.

SCIRE, Joseph S. et al. A user's guide for the CALPUFF dispersion model. **Earth Tech, Inc**, v. 521, p. 1-521, 2000.

SILVA, Solange Teles da. A proteção da qualidade do ar. **Jus Navigandi, Teresina, a**, v. 1, 1997.

SORBJAN, Z. **Air Pollution Meteorology.** 2003.

SOARES, M. S. **Avaliação do Sistema de Modelagem CALPUFF aplicado ao dióxido de enxofre para as Bacias Aéreas I, II e III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.** 2010. 107 f. Monografia (Graduação em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.

SOARES, Lucas de Assis; RAMALDES, Luisa Nunes. **Estudo Comparativo dos Modelos de Dispersão Atmosférica – CALPUFF E AERMOD – Através da Análise da Qualidade do Ar na Região Metropolitana da Grande Vitória.** 2012. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

SZWARCFITER, L. **Poluentes atmosféricos por veículos leves no Brasil: Uma avaliação do potencial de programas de inspeção e manutenção e de renovação acelerada da frota.** 2004. 261 p. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled.** Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>. Acesso em: 10 março. 2022.

VICENTINI, P. C. **Uso de modelos de qualidade do ar para a avaliação do efeito do PROCONVE entre 2008 E 2020 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.** 2011. 224 p. Tese (Dissertação Engenharia Mecânica). Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 2011.

YNOUE, R.Y; REBOITA, M.S; AMBRAZZI T; SILVA, G.A.M. **Meteorologia: Noções básicas.** São Paulo: Oficinas de Textos. 2017.

ZANNETTI, P., 1990, **Air Pollution Modeling Teories, Computational Methods and Available Software**, New York: Kluwer Academic Publisher, 444p.