

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geografia**

Alceu Raposo Junior

**MAPEAMENTO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA URBANA POR MEIO DE  
SENSORES AUTOMÁTICOS MÓVEIS: uma proposta metodológica para avaliação e  
identificação de bacias atmosféricas, ilhas de poluição, bacias aéreas, bolsões de poluição  
e *hotspots*.**

Belo Horizonte  
2024

Alceu Raposo Junior

**MAPEAMENTO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA URBANA POR  
MEIO DE SENSORES AUTOMÁTICOS MÓVEIS: uma proposta  
metodológica para avaliação e identificação de bacias atmosféricas, ilhas de  
poluição, bacias aéreas, bolsões de poluição  
e *hotspots*.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais como pré-requisito para obtenção do título de doutor.

Área de Concentração: Análise Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes Assis

Belo Horizonte  
2024

R219m  
2024

Raposo Junior, Alceu.

Mapeamento da poluição atmosférica urbana por meio de sensores automáticos móveis [manuscrito] : uma proposta metodológica para avaliação e identificação de bacias atmosféricas, ilhas de poluição, bacias aéreas, bolsões de poluição e hotspots / Alceu Raposo Junior. – 2024.

214 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Wellington Lopes Assis.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Bibliografia: f. 203-213.

Inclui anexo.

1. Poluição urbana – Teses. 2. Climatologia urbana – Teses. 3. Ar – Poluição – Teses. 4. Saúde urbana – Teses. 5. Belo Horizonte (MG) – Poluição – Teses. 6. Belo Horizonte (MG) – Clima – Teses. I. Assis, Wellington Lopes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 551.588.74(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**"MAPEAMENTO DA POLUIÇÃO URBANA POR MEIO DE SENSORES AUTOMÁTICOS MÓVEIS: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA TENDO COMO ESTUDO DE CASO O MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE (MG)"**

**ALCEU RAPOSO JÚNIOR**

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **29 de novembro de 2024**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

**Edson Soares Fialho**

UFV

**Alecir Antônio Maciel Moreira**

PUC/Minas

**Taíza de Pinho Barroso Lucas**

CEFET/Minas

**Carlos Henrique Jardim**

IGC/UFMG

**Wellington Lopes Assis - Orientador**

IGC/UFMG

Belo Horizonte, 29 de novembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Taíza de Pinho Barroso Lucas, Usuário Externo**, em 02/12/2024, às 14:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alecir Antonio Maciel Moreira, Usuário Externo**, em 02/12/2024, às 18:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edson Soares Fialho, Usuário Externo**, em 09/12/2024, às 14:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wellington Lopes Assis, Professor do Magistério Superior**, em 09/12/2024, às 14:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Henrique Jardim, Professor do Magistério Superior**, em 09/12/2024, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3742943** e o código CRC **1DDBAF02**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, por sempre guiar meus caminhos nos bons e nos maus momentos, os caminhos foram longos até aqui...

Aos meus pais, Alceu (*in memoriam*) e minha mãe querida (Maria), por mesmo sem condições financeiras e com pouca formação acreditaram no poder transformador da educação.

Ao amor da minha vida, esposa e melhor mãe, Daniela, por seu carinho, amor e dedicação em todos os momentos da minha vida, entendendo e cuidando de nossos tesouros, Marianny e Henrique. Oportunamente, também agradeço a eles por entenderem as ausências durante esses anos de dedicação aos estudos.

Ao meu orientador, professor exemplar, “irmão científico”, Welligton, por ter me aceitado em 2019 com tanto carinho, mesmo sendo um aluno sem dedicação exclusiva, sempre com zelo e compreensão em todos os momentos ao longo dessa jornada.

À banca avaliadora deste trabalho, que eu julgava impossível de conseguir reunir...Mas sim, conseguimos fazer com que cada um tirasse um tempo do seu dia para ler este projeto, assistir à minha apresentação e ainda trazer ideias e aprofundamentos fundamentais para a minha formação profissional.

A empresa Almont (Alberto e André) por ter emprestado a estação e qualidade do ar, sem nenhum custo, acreditando na pesquisa e no meu trabalho, minha eterna gratidão por isso.

À UFMG, uma das maiores universidades do mundo, que me deu as maiores oportunidades de estudar em alto nível de forma gratuita e democrática, lugar em que conheci professores e pesquisadores maravilhosos. Somente por meio da educação de qualidade e universal é possível mudar a realidade do nosso povo.

## RESUMO

Dados publicados pela OMS (2021), indicam que a exposição da população mundial aos poluentes atmosféricos cause cerca de 7 milhões de mortes prematuras e resulte na perda de milhões de anos de vidas. Nas crianças, isso pode incluir redução do crescimento e função pulmonar, infecções respiratórias graves como asma e bronquite. Nos adultos, a cardiopatia isquêmica e o acidente vascular cerebral são as causas mais comuns de morte prematuras atribuíveis à poluição atmosférica e, também, estão surgindo evidências de outros efeitos, como diabetes e doenças neurodegenerativas. Cerca de 98% das regiões urbanas no mundo com população superior a 100.000 habitantes, especialmente nos países de baixa e média renda per capita, não atendem às diretrizes da OMS para o MP<sub>2,5</sub>, percentual este que deve ser ainda maior depois que valores de referência mais restritivos foram recomendados (OMS, 2021). Ao tratar a cidade como um espaço orgânico, em constante movimento e produção, é possível entender que ela promove um acúmulo de fenômenos sociais e ambientais que, muitas vezes, são difíceis de discretizar (sistemas complexos), os quais se manifestam no espaço e influenciam diretamente nas condições de saúde e na qualidade de vida da população. Assim como a hipótese a ser testada nesta tese, tem-se a possibilidade de que a circulação de veículos nas grandes cidades, especialmente em áreas de maior concentração de tráfego/engarrafamento e de arquitetura, seja favorável à manutenção de “bacias atmosféricas”, “ilhas de poluição” ou “bacias aéreas”, conceitos ainda pouco explorados ou testados na prática (campo). Como recorte geográfico, foi selecionada a cidade de Belo Horizonte- MG, tendo características espaciais urbanas típicas para realização da pesquisa de campo por meio de monitoramento direto da qualidade do ar, utilizando para isso estações de qualidade do ar automáticas e móveis. Os dados finais da pesquisa mostraram que existe uma diferença bastante significativa na qualidade do ar em Belo Horizonte durante o período de seca (inverno) e o verão (chuvoso). Por fim, foi possível observar que a qualidade do ar em Belo Horizonte, durante o inverno, possui uma maior distribuição geográfica, caracterizando-se como uma espessa camada de poluição sobre grande parte da região metropolitana e, de certa forma, homogeneizando a poluição sobre o território, diferentemente do verão que possui outro tipo de configuração espacial.

**Palavras-chave:** poluição atmosférica; clima urbano; atmosfera urbana; material particulado; saúde urbana; bolsões de poluição; bacias atmosféricas; ilhas de poluição; bacias aéreas.

## ABSTRACT

Data published by the WHO (2021) indicate that exposure of the global population to air pollutants causes around 7 million premature deaths and results in the loss of millions of years of life. In children, this can include reduced growth and lung function, and serious respiratory infections such as asthma and bronchitis. In adults, ischemic heart disease and stroke are the most common causes of premature death attributable to air pollution, and evidence is also emerging of other effects, such as diabetes and neurodegenerative diseases. Around 98% of urban areas in the world with a population greater than 100,000 inhabitants, especially in low- and middle-income countries per capita, do not meet WHO guidelines for PM<sub>2.5</sub>, a percentage that is expected to be even higher after more restrictive reference values have been recommended (WHO, 2021). By treating the city as an organic space, in constant movement and production, it is possible to understand that it promotes an accumulation of social and environmental phenomena that are often difficult to discretize (complex systems), which manifest themselves in space and directly influence the health conditions and quality of life of the population. As with the hypothesis to be tested in this thesis, it is possible that the circulation of vehicles in large cities, especially in areas with greater concentration of traffic/traffic jams and architecture, is favorable to the maintenance of “atmospheric basins”, “pollution islands” or “air basins”, concepts that are still little explored or tested in practice (field). The city of Belo Horizonte, MG, was selected as the geographic location, since it has typical urban spatial characteristics for conducting field research through direct monitoring of air quality, using automatic and mobile air quality stations. The final data from the research showed that there is a very significant difference in air quality in Belo Horizonte during the dry season (winter) and the summer (rainy season). Finally, it was possible to observe that the air quality in Belo Horizonte, during the winter, has a greater geographical distribution, characterized as a thick layer of pollution over a large part of the metropolitan region and, in a certain way, homogenizing the pollution over the territory, unlike the summer which has another type of spatial configuration.

**Keywords:** air pollution; urban climate; urban atmosphere; particulate matter; urban health; pollution pockets; atmospheric basin; pollution islands; air basins.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeitos do MP sobre o corpo humano.....	322
Figura 2: Classificação escalar em três níveis interativos .....	377
Figura 3: Desenho esquemático das camadas urbanas sobre o perfil urbano de Belo Horizonte .....	38
Figura 4: Desenho esquemático da estrutura da CLP.....	41
Figura 5: Imagem da região adensada do Bairro Buritis e da região menos adensada da Pampulha .....	45
Figura 6: Fenômeno de formação das tempestades nos ambientes urbanos.....	49
Figura 7: Esquema da distribuição de tamanhos dos aerossóis atmosféricos e os processos que influenciam cada fração de tamanho de partículas.....	51
Figura 8: Readaptação do diagrama esquemático dos efeitos radiativos dos aerossóis. ....	53
Figura 9: Emissões Totais desagregadas por Setor em tCO <sub>2</sub> e .....	58
Figura 10: Delimitação da área urbana e das 12 zonas tampão, usando Pequim como exemplo. (A) Imagem em cores falsas do <i>Landsat Thematic Mapper</i> em 20 de maio de 2010. (B) Média anual PM <sub>2,5</sub> concentrações em 2010. (C) Mapa de cobertura do solo do CLUD para 2010 com resolução espacial de 30 m. ....	61
Figura 11: Bacias Aéreas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro .....	64
Figura 12: Planta Geral de Belo Horizonte em 1895.....	68
Figura 13: Praça Raul Soares em 1936.....	69
Figura 14: Vista área de Belo Horizonte em 1956 .....	72
Figura 15: Zona Industrial de Belo Horizonte (1967), Avenida Amazonas.....	72
Figura 16: Mapa de localização do município de Belo Horizonte .....	74
Figura 17: Mapa com os principais domínios litológicos do município de Belo Horizonte. ....	75
Figura 18: Mapa com a distribuição da drenagem no município de Belo Horizonte.....	78
Figura 19: Mapa de distribuição da vegetação e o uso do solo no município de Belo Horizonte .....	80
Figura 20: Balanço hídrico associado as temperaturas mensais do município de Belo Horizonte Belo Horizonte - MG ( Normais Climatológicas de 1991 - 2020) / 19° 56' 02,1"S e 43° 57' 06,9"W - Alt. 915m. ....	82
Figura 21: Esquema da atuação dos sistemas frontais no qual são acompanhados por anticiclones de origem polar em escala sinótica em Belo Horizonte (a) e A atuação da Alta	

Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) em escala sinótica e em escala regional em Belo Horizonte (b). .....	83
Figura 22: Configuração da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um eixo de intensa atividade convectiva, de orientação NW-SE de escala sinótica que atua sobre Belo Horizonte. Imagem IR GÓES-8 em 02/12/2007 às 09h TMG. ....	85
Figura 23: Fluxograma geral da pesquisa.....	91
Figura 24: Escalas Climáticas selecionadas para a pesquisa.....	96
Figura 25: Protocolo de consulta dos dados meteorológicos diários .....	98
Figura 26: Equipamento DRX Aerosol Monitor 8533. ....	102
Figura 27- Detalhe do aparelho com abertura para medição do ar em 10 microns.....	1044
Figura 28: Equipamento DRX Aerosol Monitor 8533 .....	106
Figura 29: Padrão adotado para a microlocalização da estação de qualidade do ar em campo .....	110
Figura 30: Mapa com os pontos de monitoramento realizados com a estação móvel.....	113
Figura 31: Mapa de localização das estações fixas de qualidade do ar em Belo Horizonte ..	118
Figura 32: Modelo de gráfico padrão usado no tratamento estáticos dos dados de campo...	121
Figura 33: Mapa de Localização do Município de Belo Horizonte com destaque para as vias de circulação monitoradas. ....	128
Figura 34: Imagens do satélite meteorológico GOES-16 (Canal 10) IR de 12GMT do dia 02/08/2022 (a) e das 12GMT do dia 04/08/2022 (b).....	130
Figura 35: Imagens do satélite meteorológico GOES-16 (Canal 10) IR de 12GMT do dia 08/08/2022 (c) e das 12GMT do dia 20/09/2023 (d).....	130
Figura 36: Cartas Sinóticas da Marinha de 12GMT do dia 02/08/2022 (a) e das 12GMT do dia 04/08/2022 (b). ....	131
Figura 37: Cartas Sinóticas da Marinha de 12GMT do dia 08/08/2022 (c) e das 12GMT do dia 20/09/2023 (d). ....	132
Figura 38: Gráfico de pressão atmosférica no período de 01 a 10 de agosto de 2022 (inverno) .....	133
Figura 39: Gráfico de pressão atmosférica no período de 15 a 21 de agosto de 2022 (inverno) .....	134
Figura 40: Gráfico Umidade relativa do ar no período de 01 a 10 de agosto de 2022 (inverno) .....	135
Figura 41: Gráfico de umidade relativa do ar no período de 15 a 21 de agosto de 2022 (inverno) .....	135

Figura 42: Gráfico de velocidade do vento no período de 01 a 10 de agosto de 2022 (inverno)	136
Figura 43: Gráfico de velocidade do vento no período de 15 a 21 de agosto de 2022 (inverno)	136
Figura 44: Gráfico de radiação global no período de 01 a 10 de agosto de 2022 (inverno)	137
Figura 45: Gráfico de radiação global no período de 15 a 21 de agosto de 2022 (inverno)	138
Figura 46: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Amazonas - 01 de agosto de 2022- horário de 8:30h às 13:00h	139
Figura 47: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Amazonas	140
Figura 48: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Nossa Senhora do Carmo – 02 de agosto de 2022- horário de 18:30h às 21:00h.	142
Figura 49: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Nossa Senhora do Carmo.	143
Figura 50: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo – 03 de agosto de 2022- horário de 8:30h às 10:00 hrs. e das 19:30h às 20:30 hrs.	144
Figura 51: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Barão Homem de Melo e Silva Lobo	146
Figura 52: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Padre Eustáquio – 05 de agosto de 2022- horário de 19:30h às 20:30 h.	147
Figura 53: Mapa de localização dos pontos monitorados na Rua Padre Eustáquio	149
Figura 54: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Presidente Antônio Carlos – 08 de agosto de 2022- horário de 19:00h às 20:30 h.	150
Figura 55: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Presidente Antônio Carlos	152
Figura 56: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Anel Rodoviário – 20 de setembro de 2022- horário de 08:30h às 10:00 h.	153
Figura 57: Mapa de localização dos pontos monitorados na Anel Rodoviário	155
Figura 58: Gráfico de média das concentrações de 24 horas de PM10 das estações fixas - PUC São Gabriel; PUC Barreiro e Contorno, período analisado (01/08 a 21/08)	157
Figura 59: Gráfico de correlação entre as estações fixas com base no período analisado (01/08 a 21/08)	158
Figura 60: Imagens do satélite meteorológico GOES-16 (Canal 10) IR de 12GMT do dia 31/10/2023 (a) e das 12GMT do dia 01/11/2023 (b).	159
Figura 61: Imagens do satélite meteorológico GOES-16 (Canal 10) IR de 12GMT do dia 07/11/2023 (c) e das 12GMT do dia 10/11/2023 (d).	160

Figura 62: Cartas Sinóticas da Marinha de 12GMT do dia 31/10/2023 (a) e das 12 GMT do dia 01/11/2023 (b). .....	160
Figura 63: Cartas Sinóticas da Marinha de 12GMT do dia 07/11/2023 (c) e das 12 GMT do dia 10/11/2023 (d). .....	161
Figura 64: Gráfico de precipitação total (mm) em 24 horas no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão).....	162
Figura 65: Gráfico de umidade relativa do ar (%) no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão).....	162
Figura 66: Gráfico de umidade relativa do ar no período de 05 de novembro a 10 de novembro de 2023 (verão).....	163
Figura 67: Gráfico de pressão atmosférica no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023(verão).....	164
Figura 68: Gráfico de pressão atmosférica (mb) no período de 05 de novembro a 10 de novembro de 2023 (verão).....	164
Figura 69: Gráfico de velocidade do vento no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão).....	165
Figura 70: Gráfico de velocidade do vento no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão).....	165
Figura 71: Gráfico de radiação no período de 05 de novembro a 10 de novembro de 2023 (verão) .....	166
Figura 72: Gráfico de radiação Global no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão).....	167
Figura 73: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Amazonas - 30 de outubro de 2023- horário de 8:30h às 13:00 h.....	168
Figura 74: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Amazonas. ....	169
Figura 75: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Nossa Senhora do Carmo – 31 de outubro de 2023- horário das 18:30h às 21:00 h. ....	170
Figura 76: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Nossa Senhora do Carmo. ....	171
Figura 77: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo – 01 de novembro de 2023- horário de 8:30 às 10:00 hrs. e das 19:30 às 20:30 hrs. ....	173
Figura 78: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo.....	174

Figura 79: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Presidente Antônio Carlos – 06 de novembro de 2023- horário das 19:00h às 20:30h. ....	175
Figura 80: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Presidente Antônio Carlos	176
Figura 81: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Padre Eustáquio – 10 de novembro de 2023- horário de 19:00 às 20:30 hrs. ....	177
Figura 82: Mapa de localização dos pontos monitorados na Rua Padre Eustáquio .....	178
Figura 83: Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Anel Rodoviário – 07 de novembro de 2023- horário das 08:30h às 10:00 h. ....	179
Figura 84: Mapa de localização dos pontos monitorados no Anel Rodoviário.....	180
Figura 85: Gráfico de resultados dos monitoramentos de PM10 das estações fixas no período de 30/10 a 10/11/2023. ....	181
Figura 86: Resultados das Correlações de Person para as estações fixa de qualidade do ar x Sistemas Atmosféricos atuantes .....	182
Figura 87: Gráfico de média de concentrações por via no período seco (inverno).....	185
Figura 88: Gráfico de média de concentrações por via no período chuvoso (verão) .....	185
Figura 89: Mapa Hipsométrico de Belo Horizonte .....	187
Figura 90: Mapa de bacias hidrográficas de Belo Horizonte .....	189
Figura 91: Mapa de Densidade demográfica de Belo Horizonte (censo do IBGE 2022) .....	193
Figura 92: Mapa de população absoluta de Belo Horizonte (censo do IBGE 2022).....	194
Figura 93 -Exemplo esquemático de bolsão de poluição atmosférica. ....	197
Figura 94 - Exemplo esquemático de <i>hotspots</i> de poluição. ....	197

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis recomendados de AQG e metas provisórias da OMS.....	256
Tabela 2: Padrões de qualidade do ar definido pela Resolução Conama 491/2018 .....	28
Tabela 3: Padrões de qualidade do ar definido pela Resolução Conama 506/2024 .....	30
Tabela 4: Indicações técnicas para a microlocalização de estações de monitoramento .....	109
Tabela 5: Pontos monitorados na Av. Amazonas.....	114
Tabela 6: Pontos monitorados na Avenida Nossa Senhora do Carmo .....	114
Tabela 7: Pontos monitorados na Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo.....	115
Tabela 8: Pontos monitorados na Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo.....	115
Tabela 9: Pontos monitorados na Rua Padre Eustáquio .....	115
Tabela 10: Pontos monitorados na Av. Presidente Antônio Carlos. ....	116
Tabela 11: Pontos monitorados do Anel Rodoviário .....	116
Tabela 12: Estações Fixas de Qualidade do Ar .....	117
Tabela 13: Bolsões e <i>Hotspost</i> de poluição em Belo Horizonte durante o inverno e verão...	191

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Categorias escalar do clima e suas estratégias de abordagem.....	39
Quadro 2: Sistema Clima Urbano: articulações dos subsistemas segundo os canais de percepção.....	44
Quadro 3: Principais estudos de Ilhas de Poluição Urbana e Ilhas de Neblina Urbana .....	62
Quadro 4: Esquema de organização do banco de dados meteorológico de acordo as coletas realizadas – Primeira Campanha (Inverno) .....	99
Quadro 5: Esquema de organização do banco de dados meteorológico de acordo as coletas realizadas – Segunda Campanha (Verão).....	100
Quadro 6: Variáveis meteorológicas selecionadas para as análises de campo.....	101
Quadro 7: Descrição Técnica do DustTrak DRX.....	103
Quadro 8: Escala de Monitoramento da qualidade do ar.....	108
Quadro 9: Lista das vias onde foram realizados os monitoramentos da qualidade do ar – período seco (inverno).....	111
Quadro 10: Lista das vias onde foram realizados os monitoramentos da qualidade do ar – período chuvoso (verão).....	111
Quadro 11: Estruturação e organização dos dados de coleta de campo .....	120
Quadro 12: Critérios de validação da qualidade dos dados Primeira Campanha (Inverno)...	123
Quadro 13: Critérios de validação da qualidade dos dados – Segunda Campanha (Verão) ..	124

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ASAS</b>	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
<b>APAS</b>	Anticiclone Polar do Atlântico Sul
<b>APAS<sub>t</sub></b>	Anticiclone Polar do Atlântico Sul Tropicalizado
<b>BRAMS</b>	<i>Brazilian Regional Atmospheric Modeling System</i>
<b>CO</b>	Monóxido de Carbono
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>CPTEC</b>	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
<b>DAR</b>	Doenças do Aparelho Respiratório
<b>DCV</b>	Doenças Cardiovasculares
<b>DPOC</b>	Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica
<b>FE</b>	Frentes Estacionárias
<b>FEAM</b>	Fundação Estadual do Meio Ambiente
<b>FF</b>	Frente Fria
<b>FEEMA</b>	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>ICL</b>	Instabilidades Convectivas Locais
<b>IICU</b>	Intensidade das Ilhas de Calor Urbano
<b>INEA</b>	Instituto Estadual do Ambiente
<b>INMET</b>	Instituto Nacional de Meteorologia
<b>IRA</b>	Infecção Respiratória Aguda
<b>IVS</b>	Índice Vulnerabilidade à Saúde
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<b>LI</b>	Linha de Instabilidade
<b>MS</b>	Ministério da Saúde
<b>OdF</b>	Ondas de Frio
<b>OMS</b>	Organização Mundial da Saúde
<b>OPAS</b>	Organização Pan-Americana de Saúde
<b>PTS</b>	Partículas Totais em Suspensão
<b>PM<sup>10</sup></b>	Partículas Inaláveis, de diâmetro inferior a 10 micrómetros (µm)
<b>PM<sup>2,5</sup></b>	Partículas Inaláveis, de diâmetro inferior a 2,5 micrómetros (µm)
<b>SEMAD</b>	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

<b>S.C.U</b>	Sistema Clima Urbano
<b>SF</b>	Sistemas Frontais
<b>SIG</b>	Sistema de Informações Geográficas
<b>SUS</b>	Sistema Único de Saúde
<b>SVS</b>	Secretaria de Vigilância à Saúde
<b>UBL</b>	<i>Urban Boundary Layer</i>
<b>UCL</b>	<i>Urban Canopy Layer</i>
<b>UFRJ</b>	Universidade Federal do Rio de Janeiro
<b>US EPA</b>	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
<b>ZCAS</b>	Zona de Convergência do Atlântico Sul
<b>ZCOU</b>	Zona de Convergência de Umidade

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2 ASPECTOS TEÓRICOS E BASES CONCEITUAIS .....</b>	<b>22</b>
2.1 Principais Poluentes Atmosféricos .....	22
2.2 Limites Estabelecidos Para A Qualidade Do Ar .....	24
2.3 Efeitos Da Poluição Sobre A Saúde Humana .....	31
2.4 Relações entre Sistemas Meteorológicos e Influência na Qualidade do Ar ...	35
2.4.1 <i>Escalas climáticas e suas interconexões</i> .....	35
2.4.2 <i>Camadas atmosféricas</i> .....	39
2.4.3 <i>Componentes de formação do clima urbano</i> .....	42
2.5 Poluição Urbana .....	53
2.5.1 <i>Principais fontes emissoras e seus efeitos sobre o tecido urbano</i> .....	53
2.5.2 <i>Ilhas de poluição urbana, ilhas de neblina urbana e bacias aéreas</i> .....	60
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DA AREA DE ESTUDO .....</b>	<b>66</b>
3.1 Breve Histórico do Início da Capital Mineira - Belo Horizonte .....	66
3.2 Caracterização Dos Aspectos Físicos De Belo Horizonte .....	73
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>87</b>
4.1 Introdução geral .....	88
4.2 Sequenciamento Metodológico Proposto .....	90
4.3 Seleção dos materiais e métodos para cada escala climática do trabalho .....	94
4.4 Descrição dos materiais e dos equipamentos .....	101
4.5. Experimentos de Campo e Equipamentos .....	107
4.5.1 <i>Metodologia de coleta utilizada</i> .....	107
4.5.2 <i>Informações técnicas sobre a coleta de campo</i> .....	109
4.5.3 <i>Organização e tratamento estatístico dos dados</i> .....	119
4.6 Procedimentos de Análise de Qualidade e Organização de Dados .....	122
4.7 Procedimentos de Tratamento Espacial e Estatístico dos Dados .....	126
4.8 Definição dos Pontos de Monitoramento sobre As Vias .....	126
<b>5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>129</b>
5.1. Período Seco (Inverno) .....	129
5.1.1 <i>Condições atmosféricas</i> .....	129
5.1.3 <i>Resumo estatístico dos dados</i> .....	138
5.2. Período Chuvoso (Verão) .....	158
5.2.1 <i>Condições atmosféricas</i> .....	158

<i>5.2.2. Variação têmporo-espacial dos parâmetros atmosféricos.....</i>	<i>161</i>
<i>5.2.3. Resumo estatístico dos dados .....</i>	<i>167</i>
5.3. Análise Espacial dos Dados.....	182
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>198</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>203</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>20314</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da poluição atmosférica nas cidades historicamente tem oferecido enormes riscos à saúde das populações que vivem nesses locais, especialmente nas áreas em que a concentração urbana é maior, adicionalmente agravado pela presença de atividades industriais e de queima de combustíveis fósseis.

Os registros históricos remontam que a poluição do ar não é uma exclusividade dos tempos modernos, há registros desde a antiguidade, por causa da queima de madeira e de outros materiais combustíveis. Com o aumento do desmatamento e a alta taxa de urbanização nas cidades europeias, houve uma diminuição significativa da disponibilidade de madeira, o que provocou a descoberta do potencial energético do carvão mineral como uma importante alternativa de consumo energético.

Há registros da utilização do carvão como parte da atividade humana antes da era cristã, com relatos de problemas de poluição do ar para as comunidades e para a vizinhança. Os primeiros relatos datam de 351 a.C., feitas pelo filósofo grego Theophrastos, o qual se referia às condições carregadas do ar na cidade onde vivia. O poeta Horácio, em 65 a.C., explana sobre a fuligem negra nos templos oriundos da fumaça da queima de combustíveis. No ano 61 a.C., o filósofo romano Sêneca também relatou o mal-estar que o ar pesado da cidade de Roma lhe causava (Stern, 1984).

Já na Antiguidade o filósofo Seneca (60 a.C.) reconhecia que as cinzas libertadas nas erupções vulcânicas constituíam a causa da turvação atmosférica. No entanto, só no século XVIII se descobriu que os aerossóis vulcânicos podiam ser transportados a longas distâncias. Invocando o ano de 1783, Benjamin Franklin escreveu que “a época sem Verão” podia dever-se a uma erupção de um vulcão na Islândia (Alves, 2005, pág.860).

Episódios de poluição excessiva já causavam aumento do número de mortes e degradação do ambiente, ainda no período medieval, em algumas cidades da Europa. Nos registros históricos há relatos escritos de que a Rainha Eleanor (esposa de Eduardo I) registrou a primeira queixa contra o ar sujo na Inglaterra quando visitou Nottingham no ano de 1257.

No reinado de Eduardo I, durante os anos de 1272-1307, o Parlamento Britânico proibiu o uso do carvão em Londres quando o rei estivesse na cidade, devido às reclamações por parte da nobreza. No Reinado de Eduardo II, um cidadão inglês foi executado por violar esse decreto do reinado de Eduardo I, ao poluir o ar com odores devido à queima de carvão enquanto o rei esteve na cidade. Nos reinados de Ricardo III (1377-1399) e de Henrique IV (1413-1422), o

parlamento e a nobreza tentaram restringir o uso do carvão, contudo, a falta de alternativas práticas e econômicas para substituir o carvão permitiu que este continuasse a ser utilizado em toda Grã-Bretanha, gerando a degradação dos ambientes (Alves, 2005).

Desde o século XVI até meados do século XX, as emissões resultantes da queima de carvão, que progressivamente passou a ser utilizado como combustível em substituição da madeira, ocuparam quase exclusivamente o centro das atenções no respeitante à poluição atmosférica. Note-se que, em Londres, apesar das regulamentações referidas, o problema dos fumos persistiu, sendo relatados vários episódios de nevoeiros sulfurosos em documentos do século XVII. A situação agravou-se de tal forma que, no início do século XIX, o parlamento inglês criou um comité ao qual foi atribuída a competência de produzir medidas mitigadoras do problema (Alves, 2005, pág. 860).

Dados publicados pela Organização Pan-Americana de Saúde - OPAS (2019), braço da ONU para América Latina, são alarmantes para a questão da qualidade do ar. Segundo a Organização, quase toda a população do mundo, cerca de 99%, respira ar que excede os limites de qualidade recomendados pela Organização Mundial da Saúde - OMS. De acordo com o estudo, as pessoas que vivem nas cidades ainda respiram níveis insalubres de material particulado fino e dióxido de nitrogênio.

De acordo com a OPAS (2019), a poluição do ar constitui uma crise global de saúde pública. A exposição aos poluentes atmosféricos ameaça a saúde de pessoas de todas as idades, em todas as partes do mundo, tanto nas zonas urbanas quanto nas rurais, mas afeta especialmente os mais vulneráveis que são as crianças de forma especial. As crianças apresentam um maior risco que os adultos de sofrerem com os diversos efeitos da poluição do ar sobre a saúde, devido a uma combinação de fatores comportamentais, ambientais e fisiológicos. As crianças são especialmente vulneráveis durante o desenvolvimento fetal e nos primeiros anos de vida, quando os pulmões, órgãos e cérebro ainda estão amadurecendo (OPAS, 2019).

Segundo os dados da OPAS (2019), no mundo, cerca de uma a cada oito mortes foi atribuída aos efeitos conjuntos da poluição atmosférica e no domicílio – um total de 7 milhões de mortes no mundo para o ano de 2016. Cerca de 543.000 mortes de crianças com menos de 5 anos e 52.000 mortes de crianças com idade entre 5 e 15 anos foram atribuídas aos efeitos conjuntos da poluição atmosférica e no domicílio também em 2016.

A poluição do ar dentro do domicílio proveniente do cozimento, bem como a poluição atmosférica emitidas pelos veículos e indústrias causam mais de 50% das infecções agudas do trato respiratório em crianças com menos de 5 anos nos países de baixa e média renda. Do

número total de mortes atribuídas aos efeitos conjuntos da poluição atmosférica e no domicílio em todo o mundo no ano de 2016, cerca de 9% acometeram as crianças (OPAS, 2019).

Atualmente, a Organização Mundial de Saúde - OMS estima que, no Brasil, a poluição atmosférica cause cerca de cinco vezes mais mortes do que o tabagismo passivo e que sete milhões de pessoas morram todos os anos em decorrência da poluição ambiental.

Diante dessa realidade implacável, observa-se com mais proeminência o papel dos ambientes urbanos, cujos fenômenos das mais diversas ordens interagem entre si, gerando, muitas das vezes, um sistema complexo em sua essência, com importantes sinergias entre o uso e a ocupação do solo, aspectos climáticos, dinâmicas econômicas, sociais, ecológicas e topológicas.

Ao tratar a cidade como um espaço orgânico, em constante movimento e produção, é possível entender que ela promove um acúmulo de fenômenos sociais e ambientais que, muitas vezes, são difíceis de discretizar, sistemas complexos, os quais se manifestam no espaço e influenciam diretamente nas condições de saúde e sobre a qualidade de vida da população.

Nesse sentido, a cidade se torna importante e necessário objeto de investigação geográfica com vistas a compreender os fenômenos que revestem os ambientes urbanos e, ao mesmo tempo, achar soluções de ordem práticas para mitigar os problemas relacionados à poluição. Diante desse cenário desafiador, faz-se importante entender a relação das condições da qualidade do ar mediante a interação dos fenômenos econômicos, espaciais, sociais e climáticos.

Mediante esse contexto desafiador, dada gravidade das questões relacionadas aos problemas da poluição atmosférica, é importante dispender esforços para conhecer com maior profundidade os mecanismos de sinergia e cumulatividade entre a atmosfera, a superfície e as fontes emissoras antropogênicas, em especial nas áreas urbanas, dadas múltiplas fontes em interação no tecido urbano, o que lhe compete maior complexidade, como já mencionado (sistemas complexos).

Em função da complexidade em que se reveste analisar a poluição atmosférica no tecido urbano, é necessário fazer um corte temporal, espacial e do componente a ser analisado, sob o risco de se perder no universo das possibilidades e dos enormes desafios que a questão da poluição atmosférica impõe. Diante de tal cenário, no qual se propõe analisar a poluição atmosférica à luz da ciência geográfica, tem-se como caso de estudo objeto espacial, para testar as hipóteses que serão aqui apresentadas, a cidade de Belo Horizonte, como representante de uma cidade densamente urbanizada.

Ao ser lançado na atmosfera, o material particulado nas áreas urbanas pode ficar confinado na forma de “ilhas urbanas de poluição”, “bacias atmosféricas” ou “bacias aéreas”, como alguns autores costumam mencionar (Oliveira *et al.*, 2004; Crutzen 1994). Suspeita-se que esse fenômeno seja condicionado pela topografia urbana, pela arquitetura dos prédios e pela rugosidade da paisagem. Para além dessa hipótese, há uma conjectura de que as estações de qualidade do ar convencionais possam estar medindo, de forma direta, as emissões de áreas mais restritas, assim não representando a qualidade do ar regional como comumente se espera.

Nesse sentido, como hipótese a ser testada, tem-se a possibilidade de que as emissões atmosféricas em ambientes urbanos adensados, especialmente em áreas de maior concentração de tráfego/engarrafamento e morfologia urbana, sejam favoráveis à sustentação de “ilhas de poluição urbana”, “bacias atmosféricas” ou “bacias aéreas”, conceitos ainda pouco explorados e testados no mundo e no Brasil e ainda não experimentado em Belo Horizonte.

Diante da hipótese a ser testada, tem-se como perguntas norteadoras desta pesquisa as seguintes questões: i) existem de fato “bacias atmosféricas”, “ilhas de poluição” ou “bacias aéreas” que favorecem uma maior concentração de poluentes na atmosfera em Belo Horizonte? ii) Se sim, como é possível identificá-las na prática? iii) Quais seriam os métodos replicáveis para identificá-las?

Por meio dos conhecimentos geográficos e climatológicos apoiados por uso de uma estação de qualidade do ar automática, tem-se como objetivo geral entender o comportamento e dinâmica da poluição atmosférica em ambientes densamente urbanizados, em especial a existência das “bacias atmosféricas”, “ilhas de poluição” ou “bacias aéreas” na cidade de Belo Horizonte.

Diante dos desafios propostos, tem-se como objetivos específicos desta pesquisa:

i) Realizar o monitoramento da qualidade do ar (material particulado) com o uso de estações automáticas móveis em vários pontos pré-definidos nas principais vias de circulação da cidade;

ii) Realizar o monitoramento da qualidade do ar em campanhas de seca e chuva para avaliar possíveis interferências dos fenômenos meteorológicos;

iii) entender qual a dinâmica do fenômeno da poluição na capital e suas relações entre a topografia, o clima, a geometria das vias e a densidade da circulação veicular;

iv) Avaliar a existência das “bacias atmosféricas”, “ilhas de poluição” ou “bacias aéreas” na cidade de Belo Horizonte.

Diante dessa perspectiva, espera-se que, com o aprofundamento do conhecimento sobre as relações entre emissões atmosféricas urbanas e sua sinergia com os aspectos geográficos da

cidade de Belo Horizonte, possa se aprofundar no conhecimento do comportamento da poluição atmosférica na capital. Quanto maior o conhecimento sobre as relações geográficas (espaciais, climáticas, topográficas e socioeconômicas) que regem esse sistema complexo, maiores serão as chances de serem criados mecanismos de controle e de gestão das emissões por meio de políticas públicas mais eficazes.

Nesse sentido, confere a Geografia e a Climatologia urbana um importante papel na busca do conhecimento e nas contribuições para avaliação da qualidade de vida, dando a devida atenção aos aspectos fisiográficos e sistêmicos, típico da essência do olhar geográfico. Para tanto, faz-se necessário estudar os cenários urbanos, perceber sua evolução histórica, avaliar aspectos ambientais, elencar os riscos, levantar e discutir a existência de instrumentos, protocolos e ferramenta para evitar agravos à saúde humana, sempre com o olhar voltado às escalas temporal-espacial em que eles ocorrem, assim como preconizava Monteiro (1976).

Além desta introdução, este trabalho inclui outros quatro capítulos, considerações finais e referências bibliográficas. No primeiro capítulo, são apresentados os conceitos sobre os aspectos teóricos e as bases conceituais sobre poluentes atmosféricos, os efeitos da poluição sobre a saúde humana e as relações entre sistemas atmosféricos e a qualidade do ar.

O segundo capítulo contém uma breve caracterização da área de estudo, no qual se dá ênfase às condições climatológicas históricas de Belo Horizonte, a uma abordagem dos seus aspectos fisiográficos que condicionam eventualmente a circulação atmosférica típica, bem como a uma abordagem sobre a evolução do uso e da ocupação do solo capital.

No terceiro capítulo, são apresentados os procedimentos metodológicos desenvolvidos para a elaboração do estudo. Ele está organizado em três subtópicos: base cartográfica; experimentos de campo e equipamentos; organização e tratamento estatístico dos dados e elaboração do mapa síntese.

Por fim, no quarto e último capítulo, são tratadas as análises e as discussões dos resultados obtidos, voltados a responder aos objetivos da pesquisa e a verificar as hipóteses. As considerações finais seguem como finalização do trabalho, indicando e articulando os resultados alcançados do projeto, bem como os limites e as possíveis recomendações para novos estudos a partir dos resultados alcançados.

## 2 ASPECTOS TEÓRICOS E BASES CONCEITUAIS

### 2.1 Principais Poluentes Atmosféricos

A Organização Mundial de Saúde (OMS), por meio do seu no Glossário de Poluição Atmosférica, foi um dos primeiros registros oficiais do que seria poluição atmosférica:

Pollution: The introduction of pollutants into a liquid or gaseous medium, the presence of pollutants in a liquid or gaseous medium, or any undesirable modification of the composition of a liquid or gaseous medium (provisional ISO, 8). For purposes of air pollution control, an "undesirable modification" is one that has injurious or deleterious effects. Air pollution is defined by the Engineers Joint Council as "the presence in the outdoor atmosphere of one or more contaminants, such as dust, fumes, gas, mist, odor, smoke, or vapor, in quantities, of characteristics, and of duration such as to be injurious to human, plant or animal life or to property, or which unreasonably interferes with the comfortable enjoyment of life and property (WHO, pág. 76, 1980).

A alínea "a" do artigo 1º da Convenção de Genebra assim conceitua a Poluição Atmosférica:

(...)introdução pelo homem, direta ou indiretamente, de substâncias ou energias no ar resultando em efeitos deletérios capazes de pôr em perigo a saúde humana, prejudicar recursos vivos e ecossistemas, a propriedade material e prejudicar ou interferir com atividades recreativas e outras formas legítimas de uso do meio ambiente, e os "poluentes do ar" devem ser interpretados em conformidade (Hunter; Salzman; Zaelke, 2011b, p. 74, tradução).

Segundo a Resolução CONAMA 506 de 2024 em seu Art. 2º define o poluente atmosférico:

I - poluente atmosférico: qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que torne ou possa tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade (CONAMA 506; Diário Oficial da União; Publicado em: 09/07/2024 | Edição: 130 | Seção: 1 | Página: 133).

Segundo a Agência Americana de Proteção Ambiental - EPA1 (2011), os principais poluentes do ar são o monóxido de carbono (CO), chumbo (Pb), material particulado (MP), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e ozônio (O<sub>3</sub>). Dentre os poluentes

---

<sup>1</sup> EXPOSURE FACTORS HANDBOOK: 2011 EDITION, National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC.

citados, destaca-se o material particulado devido a uma série de efeitos prejudiciais causados à saúde do ser humano e ao meio ambiente.

No Brasil, segundo Ministério da Saúde, o aumento de mortes por câncer de pulmão, traqueia, brônquios e doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) foi atribuído à poluição. Dentre os principais poluentes atmosféricos maléficos à saúde humana, temos o material particulado (MP), os óxidos de nitrogênio (NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>), compostos orgânicos voláteis (COVs), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e ozônio (O<sub>3</sub>).

O monóxido de carbono (CO) é produto da combustão incompleta de combustíveis fósseis que geralmente advém de veículos em baixa velocidade e industriais, fogões a lenha, lareiras e cigarros. O CO se liga à hemoglobina no sangue no lugar do oxigênio. O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) tem também grande origem na natureza, emitido principalmente por vulcões. Pela ação humana, ele provém da queima de compostos de enxofre encontrados no carvão e no petróleo, na atmosfera, dissolve-se no vapor de água, formando ácido sulfúrico. Em altas concentrações provoca irritação no sistema respiratório e problemas cardiovasculares (CETESB, 2024).

Os hidrocarbonetos (HC) são provenientes da queima parcial de combustível que é expelido pelo motor, bem como vapor de combustível emitido de diversos pontos do veículo ou expelido durante o abastecimento veicular. Neste sentido os HC's merecem especial atenção quanto ao seu controle, já que reagem na atmosfera promovendo a formação do "smog" fotoquímico. Por sua reatividade, é comum tratar os HC como Compostos Orgânicos Voláteis (COV), onde se exclui o metano. Podem causar câncer em contatos mais prolongados, irritação da pele e dos olhos em contatos iniciais (CETESB, 2024).

Os óxidos de nitrogênio (NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>) são emitidos a partir da queima em altas temperaturas de combustíveis veiculares. Contribui na formação da chamada chuva ácida, especialmente. Constitui em um dos poluentes de maior preocupação atualmente e que requer tecnologias atualizadas de controle, já que sua formação tende a aumentar com a eficiência dos motores, principalmente nos veículos movidos a óleo diesel. O NO<sub>x</sub> participa ainda da formação do "smog" fotoquímico, cujo principal poluente é o ozônio. Os óxidos de nitrogênio penetram profundamente no sistema respiratório, podendo originar substâncias mutagênicas e carcinogênicas, atuando negativamente como destruidor dos sistemas reprodutivo, imunitário e endócrino (CETESB, 2024).

O ozônio (O<sub>3</sub>) é formado por reações fotoquímicas na atmosfera entre o NO<sub>x</sub> e COVs, provocando vários problemas de saúde como dores torácicas, tosse, irritação orofaríngea, ocular

e respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar, envelhecimento precoce e corrosão dos tecidos.

O material particulado (MP) é uma mistura complexa de líquidos ou sólidos, como poeira, fumaça, fuligem, pólen e partículas do solo, possuindo efeitos deletérios à saúde humana dependendo da sua composição e tamanho. O MP é classificado de acordo com seu diâmetro: partículas com até 30 µm de diâmetro; partículas com diâmetro inferior a 10 µm (MP10 ou fração inalável); partículas com diâmetro inferior a 2,5 µm (MP2,5 ou fina); e com diâmetro menor que 10 nm (MP 0,1 ou ultrafina).

O tamanho das partículas está diretamente ligado ao seu potencial para causar problemas de saúde, instalando-se nos pulmões e diminuindo a capacidade respiratória. Neste sentido, o controle é especialmente importante para veículos de tecnologia diesel, que são os veículos de mais expressiva emissão desse poluente. Outro fator a ser considerado é que essas emissões causam incômodos aos pedestres próximos às vias de tráfego. No caso da fuligem (fumaça preta), a coloração e o mau cheiro desta emissão causa de imediato uma atitude de repulsa e pode ainda ocasionar diminuição da segurança e aumento de acidentes de trânsito pela redução da visibilidade (CETESB, 2024).

## **2.2 Limites Estabelecidos Para A Qualidade Do Ar**

### **2.2.1 Diretrizes da OMS (Guidelines)**

De acordo com a OMS<sup>2</sup>, não há um valor considerado seguro de poluentes na atmosfera para o qual os riscos à saúde são nulos, contudo, com base em centenas de estudos epidemiológicos, a OMS estabeleceu valores médios gerais que apresentam risco mínimo para a exposição a alguns poluentes prioritários em especial os MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>.

Para a OMS, o material particulado (MP) é atualmente o poluente com maior evidência sobre efeitos adversos à saúde (OMS, 2015). É sobre esse cenário que a presente pesquisa se propõe a se debruçar sobre sua interação no tecido urbano de Belo Horizonte. Além dos desafios relacionados a poluentes prioritários (MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>) definidos pela OMS, a comunidade científica mundial questiona também sobre a necessidade de diretrizes e de padrões limites para vários outros elementos químicos e compostos orgânicos.

---

<sup>2</sup> Organização Mundial da Saúde – *World Health Organization*.

A revisão das diretrizes de 2005 da OMS resultou na atualização do documento Global Air Quality Guidelines em 2021, no qual a OMS recomenda, mediante novos estudos epidemiológicos, níveis mais restritos de concentração média (anual e diária) para os poluentes prioritários já contidos na versão de 2005. Todavia, não foi realizado nenhum avanço em relação a outros tipos de poluentes do ar, como metais e compostos orgânicos voláteis (COVs).

As novas diretrizes da OMS (2021) recomendam novos níveis de qualidade do ar para os seis poluentes mais deletérios - aqueles para os quais houve o maior aumento de evidências científicas demonstrando que a exposição causa efeitos nocivos à saúde. Agir sobre esses poluentes, os chamados clássicos - partículas inaláveis ou material particulado fino (MP), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), ozônio (O<sub>3</sub>) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) - também tem impacto sobre outros poluentes prejudiciais (OPAS<sup>3</sup>, 2021).

Os riscos à saúde associados a partículas de diâmetro igual ou menor que 10 e 2,5 micra (µm), MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>, respectivamente, são de particular relevância para a saúde pública como um todo, uma vez que tanto as MP<sub>2,5</sub> quanto as MP<sub>10</sub> são capazes de penetrar profundamente nos pulmões. O MP<sub>2,5</sub> pode entrar, até mesmo, na corrente sanguínea, resultando principalmente em impactos cardiovasculares e respiratórios, também afetando outros órgãos. Em 2013, a poluição do ar exterior e as partículas inaláveis foram classificadas como cancerígenas pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (*IARC*, na sigla em inglês) ligada à OMS (OPAS, 2021).

Os Guidelines (OMS, 2021) também destacam boas práticas para o manejo de certos tipos de partículas inaláveis (a saber: carbono negro ou carbono elementar, partículas ultrafinas, partículas advindas de tempestades de areia e poeira) para as quais atualmente não há evidências quantitativas suficientes para definir valores-guia de qualidade do ar. Elas são aplicáveis a ambientes internos e externos em todo mundo e se aplicam a todos os locais (OPAS, 2021).

Segundo a OPAS em sua publicação em Genebra, 22 de setembro de 2021:

As novas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar (AQG, na sigla em inglês) da Organização Mundial da Saúde (OMS) fornecem evidências claras dos danos que a poluição do ar inflige à saúde humana, em concentrações ainda mais baixas do que se acreditava. As diretrizes recomendam novos valores-guia de qualidade do ar para proteger a saúde das populações, reduzindo os níveis dos principais poluentes atmosféricos, alguns dos quais também contribuem para a mudança do clima. Desde a última atualização global da OMS de 2005, houve um crescimento acentuado das evidências que mostram como a poluição do ar afeta diferentes aspectos da saúde. Por esse motivo, e após uma revisão sistemática das evidências acumuladas, a OMS ajustou quase todos os valores-guia de qualidade do ar para baixo, alertando que

---

<sup>3</sup> Organização Pan-Americana da Saúde – OPAS, organismo ligado a OMS para a América.

exceder os novos níveis das diretrizes de qualidade do ar traz riscos significativos para a saúde. Por outro lado, aderir a estes níveis pode salvar milhões de vidas.

A cada ano, estima-se que a exposição à poluição do ar cause 7 milhões de mortes prematuras e resulte na perda de milhões de anos de vida saudáveis. Em crianças, isso pode incluir redução do crescimento e função pulmonar, infecções respiratórias e agravamento da asma. Em adultos, a cardiopatia isquêmica e o acidente vascular cerebral são as causas mais comuns de morte prematura atribuíveis à poluição atmosférica, e também estão surgindo evidências de outros efeitos, como diabetes e doenças neurodegenerativas. Isso coloca a carga de doenças atribuíveis à poluição do ar no mesmo nível de outros grandes riscos globais à saúde, como dieta inadequada e tabagismo.

A poluição atmosférica é uma das maiores ameaças ambientais à saúde humana, juntamente com a mudança do clima. Melhorar a qualidade do ar pode ajudar os esforços de mitigação da mudança do clima, enquanto a redução das emissões, por sua vez, melhorará a qualidade do ar. Ao se esforçar para atingir esses níveis de diretrizes, os países estarão tanto protegendo a saúde quanto mitigando a mudança do clima em nível mundial (OPAS, 2021).

**Tabela 1:** Níveis recomendados de AQG e metas provisórias da OMS

Poluente	Tempo médio	Meta provisória				Nível AQG
		1	2	3	4	
PM2,5, µg/m3	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas por dia	75	50	37,5	25	15
PM10, µg/m3	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas por dia	150	100	75	50	45
O3, µg/m3	Temporada de picob	100	70	–	–	60
	8 horas	160	120	–	–	100
NO2, µg/m3	Anual	40	30	20	–	10
	24 horas por dia	120	50	–	–	25
SO2, µg/m3	24 horas por dia	125	50	–	–	40
CO, mg/m3	24 horas por dia	7	–	–	–	4

<sup>1</sup> 99º percentil (ou seja, 374 dias de excedência por ano).

<sup>2</sup> Média da concentração média diária máxima de O3 em 8 horas nos seis meses consecutivos com a maior concentração média de O3 em seis meses.

**Fonte:** Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS, 2021.

### 2.2.2 Padrão brasileiro de qualidade do ar

No Brasil, a Legislação Ambiental Federal, a qual indica os valores de referência para a qualidade do ar de ambientes externos, foi estabelecida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) até 2024 por meio da Resolução nº 491 de 19 de novembro de 2018. Até 2018, os padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Conama se alinhavam àqueles da

Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) estabelecidos em 1987. Atualmente, os padrões finais (PF) de qualidade do ar estabelecidos pelo Conama seguem as diretrizes publicadas pela OMS em 2000 e revisadas em 2005.

Uma das críticas à Resolução Conama 491/2024, para além dos avanços importantes para a gestão da qualidade do ar, especialmente para o monitoramento do MP, é o fato de que não ela apresenta prazos definidos e de urgência adequada. De acordo com a Resolução Conama 491/2018, após três anos da publicação dessa resolução, ou seja, em 2021, os órgãos ambientais deveriam elaborar um plano de controle de emissões atmosféricas, que seria definido em regulamentação própria.

Embora a Resolução Conama 491/2018 mencione que se orienta pelos padrões da OMS, isso não ocorre de fato no estabelecimento dos chamados padrões de qualidade do ar intermediários - PI: padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas (TAB.).

Assim, ainda que a Resolução Conama 491/2018 busque atingir o padrão final, passados décadas dos relatórios da OMS indicando os prejuízos à saúde humana e os valores orientadores mais seguros - não estabeleceu períodos peremptórios entre os estágios intermediários (PI-1, PI-2 e PI-3) e a etapa final (PF), estimulando, de certa forma, a inércia de qualquer tentativa de atingir os limites mais restritivos, em especial sobre aqueles entes federativos que ficam sobre pressão dos agentes econômicos locais. Afinal, a razão da existência de padrões intermediários é que eles pudessem funcionar efetivamente como objetivos temporários, levando, de forma escalonada, ao alcance dos padrões finais. Isso exigiria mecanismos e prazos que pudessem efetivamente estimular a progressão para os padrões mais restritivos ao longo do tempo, o que na prática não aconteceu.

**Tabela 2:** Padrões de qualidade do ar definido pela Resolução Conama 491/2018

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	ppm
		µg/m <sup>3</sup>	µ/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	
Material Particulado - MP10	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP2,5	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual <sup>1</sup>	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO <sub>2</sub>	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual <sup>1</sup>	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO <sub>2</sub>	1 hora <sup>2</sup>	260	240	220	200	-
	Anual <sup>1</sup>	60	50	45	40	-
Ozônio - O <sub>3</sub>	8 horas <sup>3</sup>	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas <sup>3</sup>	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual <sup>4</sup>	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb <sub>5</sub>	Anual <sup>1</sup>	-	-	-	0,5	-
1 - Média aritmética anual						
2 - Média horária						
3 - Máxima média móvel obtida no dia						
4 - Média geométrica anual						
5 - Medido nas partículas totais em suspensão						

**Fonte:** Resolução Conama 491 de 2018.

Nos estudos mencionados no capítulo anterior, observa-se que com o aumento superior a 10 µg/m<sup>3</sup> na concentração de MP10 há clara correlação com o decréscimo na função pulmonar, tem-se, também, conforme estudo realizado na Suíça, a redução de 10 µg/m<sup>3</sup> na concentração de MP10 acarreta benefícios diretos à saúde humana (Downs *et al.*, 2007).

Assim, o valor da concentração de MP10, permitido pela legislação brasileira (40 µg/m<sup>3</sup> média anual), impõe riscos à saúde pulmonar do brasileiro. A legislação permite, também, até 40 µg/m<sup>3</sup> de média anual de SO<sub>2</sub>, podendo ser inferido que, além dos limites de MP10 estarem elevados, as concentrações de SO<sub>2</sub> permitida também acarreta malefícios à saúde humana. Se

1 µg/m<sup>3</sup> aumenta em 30% a chance de desencadear asma, de acordo com estudo na Suíça, uma concentração permissiva da legislação brasileira de 40 µg/m<sup>3</sup> aumenta essa chance de desenvolver asma em um percentual maior que 30% (Künzli *et al.*, 2008).

Diante das críticas apontadas para a Resolução Conama<sup>o</sup> 491/2018 o Plenário do Supremo Tribunal Federal (STF) em maio de 2022, no exame da Ação Direta de Inconstitucionalidade (ADI) 6148, determinou que o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) editasse uma nova resolução sobre padrões de qualidade do ar. A nova diretriz deveria levar em consideração as diretrizes estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2021, à luz da realidade nacional, das peculiaridades locais, dos primados da livre iniciativa, do desenvolvimento social e da redução da pobreza. Caso não seja editada uma resolução no prazo fixado, prevalecerão, no Brasil, as diretrizes da OMS.

Com prazo determinado de 24 meses pelo STF para edição uma nova resolução sobre qualidade do ar, em julho de 2024 foi editada uma nova a Resolução Conama 506/2024, que estabeleceu novos padrões nacionais de qualidade do ar considerando quatro Padrões de Qualidade do Ar Intermediários (PI-1 a PI-4), além de Padrões de Qualidade do Ar Finais (PF). Essa nova resolução estabeleceu, também, prazos para as mudanças dos Padrões de Qualidade do Ar Intermediários (PI-1 a PI-4).

Art. 4<sup>o</sup> Os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar definidos nesta Resolução serão adotados sequencialmente, em cinco etapas, conforme Anexo I.

§ 1<sup>o</sup> A primeira etapa, que compreende os padrões de qualidade do ar intermediários PI-1, vigora até 31 de dezembro de 2024.

§ 2<sup>o</sup> Os padrões de qualidade do ar intermediários PI-2 entrarão em vigor em 1<sup>o</sup> de janeiro de 2025.

§ 3<sup>o</sup> Os padrões de qualidade do ar Intermediários PI-3 entrarão em vigor em 1<sup>o</sup> de janeiro de 2033.

§ 4<sup>o</sup> Os padrões de qualidade do ar intermediários PI-4 entrarão em vigor em 1<sup>o</sup> de janeiro de 2044, sendo possível a antecipação ou prorrogação desta data, uma única vez, por um período máximo de quatro anos, desde que observado o procedimento e verificados os requisitos previstos no art. 6<sup>o</sup> desta Resolução.

§ 5<sup>o</sup> Os padrões de qualidade do ar finais - PF entrarão em vigor em data a ser definida em resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - Conama, conforme estabelecido no art. 6<sup>o</sup> desta Resolução (CONAMA, 2024).

**Tabela 3:** Padrões de qualidade do ar definido pela Resolução Conama 506/2024

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PF	
		µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	ppm
Material Particulado - MP10	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	15	-
Material Particulado - MP2,5	24 horas	60	50	37	25	15	-
	Anual <sup>1</sup>	20	17	15	10	5	-
Dióxido de Enxofre - SO2	24 horas	125	50	40	40	40	-
	Anual <sup>1</sup>	40	30	20	20	20	-
Dióxido de Nitrogênio - NO2	1 hora <sup>2</sup>	260	240	220	200	200	-
	Anual <sup>1</sup>	60	50	45	40	10	-
Ozônio - O3	8 horas <sup>2</sup>	140	130	120	100	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	15	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	-	240	-
	Anual <sup>4</sup>	-	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb <sup>5</sup>	Anual <sup>1</sup>	-	-	-	-	0,5	-

1 - média aritmética anual

2 - máxima média horária obtida no dia

3 - máxima média móvel obtida no dia

4 - média geométrica anual

5 - medido nas partículas totais em suspensão

**Fonte:** Resolução Conama 506/2024.

Disponível em [https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com\\_sisconama&view=atonormativo&id=756](https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=atonormativo&id=756).

Acessado em: Agosto de 2024.

### 2.3 Efeitos Da Poluição Sobre A Saúde Humana

De acordo com a Organização Pan-Americana de Saúde - OPAS (2019), a poluição do ar constitui uma crise global de saúde pública. A exposição aos poluentes atmosféricos ameaça a saúde de pessoas de todas as idades, em todas as partes do mundo, tanto nas zonas urbanas quanto nas rurais, mas afeta especialmente os mais vulneráveis que são as crianças de forma especial. As crianças apresentam um maior risco que os adultos de sofrerem com os diversos efeitos adversos da poluição do ar sobre a saúde, devido a uma combinação de fatores comportamentais, ambientais e fisiológicos.

Dados publicados pela OMS (2021), indicam que a exposição da população mundial aos poluentes atmosféricos cause cerca de 7 milhões de mortes prematuras e resulte na perda de milhões de anos de vidas. Nas crianças, isso pode incluir redução do crescimento e função pulmonar, infecções respiratórias graves como asma e bronquite. Nos adultos, a cardiopatia isquêmica e o acidente vascular cerebral são as causas mais comuns de morte prematuras atribuíveis à poluição atmosférica e, também, estão surgindo evidências de outros efeitos, como diabetes e doenças neurodegenerativas.

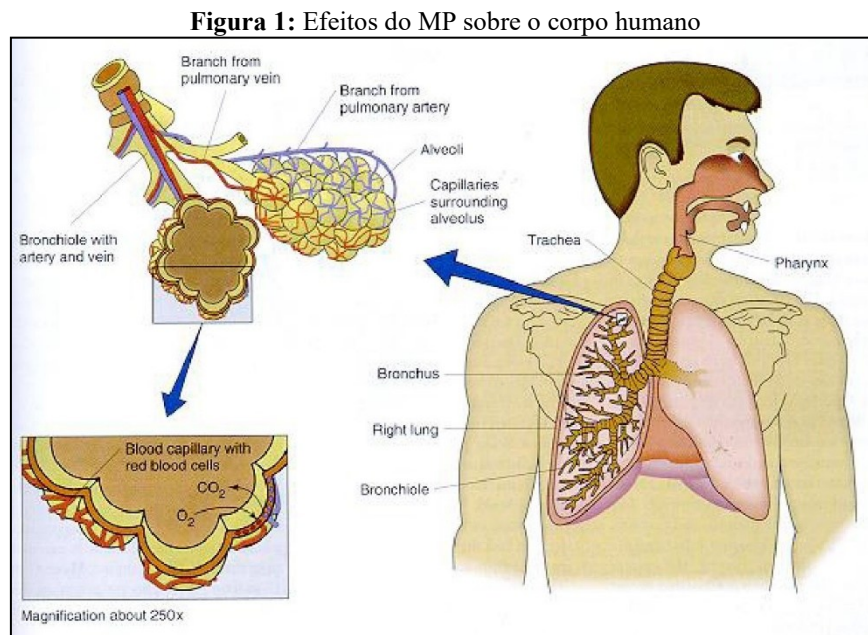
Para a OPAS (2019), no mundo, cerca de uma a cada oito mortes foi atribuída aos efeitos conjuntos da poluição atmosférica e no domicílio – um total de 7 milhões de mortes no mundo para o ano de 2016. Cerca de 543.000 mortes de crianças com menos de 5 anos e 52.000 falecimentos com idade entre 5 e 15 anos foram atribuídas aos efeitos conjuntos da poluição atmosférica e no domicílio também em 2016 (Junior *et al.*, 2021).

A exposição de longo prazo à poluição atmosférica está associada a efeitos crônicos para a saúde (por exemplo, morte), enquanto os níveis de poluição atmosférica de curto prazo são responsáveis pelo aumento do número de hospitalizações (Freitas *et al.*, 2013; Gouveia *et al.*, 2019) e, também, podem estar correlacionados com a mortalidade diária (Gouveia, 2018). O ozônio está mais relacionado à mortalidade por exposição curta (Bell *et al.*, 2005).

Dados da OMS apontam que 98% das regiões urbanas no mundo com população superior a 100.000 habitantes, especialmente nos países de baixa e média renda per capita, não atendem às diretrizes da OMS para o MP2,5, percentual este que deve ser ainda maior depois que valores de referência mais restritivos foram recomendados (OMS, 2021). É importante salientar que a OMS ratifica que pode haver efeitos deletérios à saúde mesmo quando a concentração de material particulado se adequa aos limites estabelecidos, pois isso depende de cada organismo de forma bastante individualizada.

Um importante preditor objetivo, quantitativo e precoce de morbidade e de mortalidade cardiorrespiratória em relação aos efeitos da poluição do ar é a função pulmonar. A justificativa para a qualidade do ar atmosférico interferir na saúde respiratória é devido à grande superfície de contato entre o aparelho respiratório e o ar ambiente. Ao atingir a circulação sistêmica por meio do sistema respiratório, uma quantidade grande de poluentes atinge outros órgãos, causando-lhes malefícios diversos (Junior *et al.*, 2021).

A concentração de oxidantes e pró-oxidantes contidos no Material Particulado e gases ocasionam a formação de radicais livres de oxigênio e de nitrogênio que induzem ao estresse oxidativo nas vias aéreas, iniciando uma resposta inflamatória com liberação de citocinas, quimiocinas e moléculas de adesão. Esse processo leva à inflamação do sistema respiratório e pode causar efeitos sistêmicos (FIG.1) (Junior *et al.*, 2021).



**Fonte:** Fornaro, 2018, p. 54.

Estudos recentes do Ministério da Saúde apontam que, no Brasil, as mortes em decorrência da poluição atmosférica aumentaram 14% em dez anos. O número de óbitos por Doenças Crônicas não Transmissíveis no período de 2006 a 2016 passou de 38.782 para 44.228 mortes. Com o aumento da exposição à poluição, houve acréscimo do número de mortes evitáveis por doenças não transmissíveis no Brasil, sobretudo nas regiões urbanas e em estados com grande número de queimadas. De acordo com o Ministério da Saúde, o aumento de mortes por câncer de pulmão, traqueia e brônquios e doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) foram atribuídas à poluição (Junior *et al.*, 2021).

Estudos demonstram que a poluição do ar tem aumentado o desenvolvimento de novos casos de asma no mundo todo, principalmente em áreas mais urbanizadas e industrializadas, grande exemplo é o aumento da incidência de asma na China (Arbex *et al.*, 2012).

O aumento da morbidade respiratória por DPOC foi relacionado à exposição ao ar poluído, bem como ao acréscimo das exacerbações de DPOC e a elevação do número de admissões hospitalares por essa causa. Vários estudos correlacionaram a incidência de infecção do trato respiratório inferior, sobretudo em crianças menores de 5 anos, com maiores concentrações de poluentes do ar (Arbex *et al.*, 2012).

O aumento nas hospitalizações por pneumonia foi correlacionada com altos níveis de concentração de NO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub> a longo prazo. Foi evidenciado que a ação direta dos cancerígenos e a inflamação crônica induzida por poluentes leva ao desenvolvimento de câncer de pulmão (Arbex *et al.*, 2012).

A redução do desempenho aeróbio de atletas foi associada à realização de exercícios próximos a vias de tráfego intenso resultando em um aumento dos níveis de carboxi-hemoglobina, sendo que 30 minutos de corrida elevou os níveis da carboxi-hemoglobina equivalente ao consumo de 10 cigarros/dia (Carlisle; Sharp, 2001).

Estudos realizados em Londres comparando parâmetros da função pulmonar em 60 adultos com asma em duas ocasiões: duas horas após caminhada pela *Oxford Street* (via de tráfego intenso de veículos) e pelo *Hyde Park* (parque florestal). Os resultados indicaram uma diminuição da função pulmonar com exposição aos poluentes, com consequências da redução da cavidade vital forçada (4CVF) e do volume expiratório forçado no 1º segundo VEF15. Nesse sentido, a *American Heart Association* recomenda evitar a realização de exercícios físicos próximo às regiões com qualidade do ar insatisfatória (Brook *et al.*, 2010).

Na Alemanha, foi feito um estudo transversal com 2.593 mulheres em 7 comunidades. Foi constatada associação negativa entre os níveis de NO<sub>2</sub> e MP<sub>10</sub>, no volume expiratório forçado no 1º segundo (VEF1), na cavidade vital forçada (CVF) e no índice de *Tiffeneau-Pinellina*, relação VEF1/CVF. Um aumento anual de 7 µg/m<sup>3</sup> de MP<sub>10</sub> foi associado a uma redução de 5% no VEF1 e de 1%, na relação VEF1/CVF e, para um aumento anual de 16% de NO<sub>2</sub>, houve redução de 4% no VEF1 e de 1% na relação VEF1/CVF (Schikowski *et al.*, 2005).

---

<sup>4</sup> Capacidade Vital (CV) - representa o maior volume de ar mobilizado em uma expiração. Pode ser obtida através de manobras forçadas (CVF) ou lentas (CVL).

<sup>5</sup> Volume expiratório forçado no primeiro segundo (VEF1) - representa o volume de ar exalado no primeiro segundo durante a manobra de CVF.

Outro estudo prospectivo foi realizado com 4.742 adultos entre 18 e 60 anos acompanhados por 11 anos em 8 comunidades na Suíça. Esse estudo evidenciou redução estatisticamente significativa das taxas anuais em VEF1 de 9%, FEF 25-75% de 16% e da relação VEF1/CVF de 6% associadas ao declínio, ao longo desses 11 anos, de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na média anual do MP10 (Downs *et al.*, 2007).

Pesquisadores em Atenas, Grécia, realizaram um estudo em que avaliaram os efeitos agudos de MP10 e de SO<sub>2</sub> sobre os atendimentos de pessoas de 0 a 14 anos nas emergências de 2001 a 2004. Aumento de 2,2% nos atendimentos por asma foi associado ao aumento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nos níveis de MP10 e um aumento de 6% nos atendimentos por asma foi associado ao aumento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de SO<sub>2</sub> (Samoli *et al.*, 2011).

Por meio de um estudo corte, realizado com 2.725 adultos na Suíça, no período de 1991 e 2002, foi demonstrado que pessoas que residiam em áreas mais poluídas apresentavam maior chance de evoluir com asma. Foi estimado um aumento de 30% no desenvolvimento de asma para cada aumento de 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na concentração de MP10 emitido pelo tráfego. Os indivíduos analisados nesse estudo foram adultos não fumantes (Künzli *et al.*, 2009).

Em São Paulo, foram avaliados 1.769 pacientes acima de 40 anos entre 2001 e 2003. Esse estudo mostrou que aumento nas concentrações de MP10 em 28,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e de SO<sub>2</sub> de 7,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se correlacionaram com aumento de 6,7% no número de atendimentos por DPOC no dia da exposição e aumento cumulativo em 6 dias de 19% e 16% de consultas por DPOC (Arbex *et al.*, 2009).

Em um estudo prospectivo realizado em 12 comunidades na Califórnia, EUA, foi acompanhado 1.759 crianças de 10 a 18 anos de idade. Essas comunidades apresentavam níveis diferentes de NO<sub>2</sub>, vapor ácido, MP<sub>2,5</sub> e carbono elementar. Foi concluído que crianças que viviam em áreas com níveis ambientais maiores de MP apresentaram diminuição significativa do VEF1, cerca de 100 mL, quando comparadas com as crianças que viviam em áreas menos poluídas. Crianças que viviam em comunidades com concentrações médias de MP<sub>2,5</sub> de 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (mais poluídas) tiveram uma proporção de VEF1 < 80% cinco vezes maior que nas comunidades com concentrações médias de MP<sub>2,5</sub> de 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (menos poluídas) (Gauderman *et al.*, 2004).

Em Pequim, durante os jogos olímpicos de 2008, houve redução na emissão e na concentração de MP<sub>2,5</sub> de 78,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para 46,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e de O<sub>3</sub> de 65,8 ppb para 61 ppb devido à diminuição do tráfego de veículos automotores. Essa diminuição ocasionou em uma queda de 41,6% no atendimento em serviços de emergência devido à asma no período analisado (Arbex *et al.*, 2012).

Aumento de 2,8% no número de internações hospitalares por pneumonia foi associado ao aumento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na concentração de MP2,5 em estudo realizado em cinco hospitais romanos entre 2001 e 2005. Os indivíduos avaliados nesse estudo apresentavam idade superior a 35 anos (Belleudi *et al.*, 2010). Aumento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na concentração de MP2,5 foi relacionado ao aumento de 20% de óbitos por pneumonia e influenza em estudo de corte realizado nos EUA (Pope *et al.*, 2004).

Um estudo prospectivo realizado em 50 estados nos EUA com 500.000 indivíduos evidenciou um acréscimo de 14% na incidência de câncer de pulmão associado ao aumento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na concentração de MP2,5 (Pope, *et al.*, 2002).

A elevação de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na concentração de MP2,5 aumenta entre 6% e 17% a mortalidade cardiopulmonar, demonstrado nos principais estudos de mortalidade nos EUA (Pope *et al.*, 2007).

Segundo a legislação brasileira de 2018, CONAMA 491, é permitida a emissão média anual de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de MP2,5, configurando um padrão mais próximo da realidade das comunidades mais poluídas dos EUA. Os estudos mencionados acima sobre a concentração de MP2,5 explicitam que aumentos de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  na concentração de MP2,5 pioram significativamente a função pulmonar, aumentam a chance de pneumonia, influenza, câncer de pulmão, asma e mortalidade cardiopulmonar.

Portanto, as concentrações permitidas por lei estão superiores aos valores que causam deterioração da saúde do sistema respiratório. Fazendo um paralelo entre o estudo realizado em Pequim durante os jogos olímpicos com a legislação CONAMA 491 tem-se que, no Brasil, são permitidos até 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de MP2,5 em momentos de emissões agudas desse poluente, conclui-se que esse limite é próximo às margens superiores de emissão em Pequim, China, em períodos de maiores concentrações emitidas de MP2,5.

## **2.4 Relações entre Sistemas Meteorológicos e Influência na Qualidade do Ar**

### **2.4.1 Escalas climáticas e suas interconexões**

Ao resgatar o eixo central deste estudo, inter-relações entre clima e poluição atmosférica, torna-se importante realizar uma visita aos conceitos de escalas climáticas e suas interconexões; com a finalidade de perceber como ocorre parte dos fenômenos climáticos em escala local, sobretudo em áreas urbanas, e como eles são desencadeados por sistemas atmosféricos de larga escala.

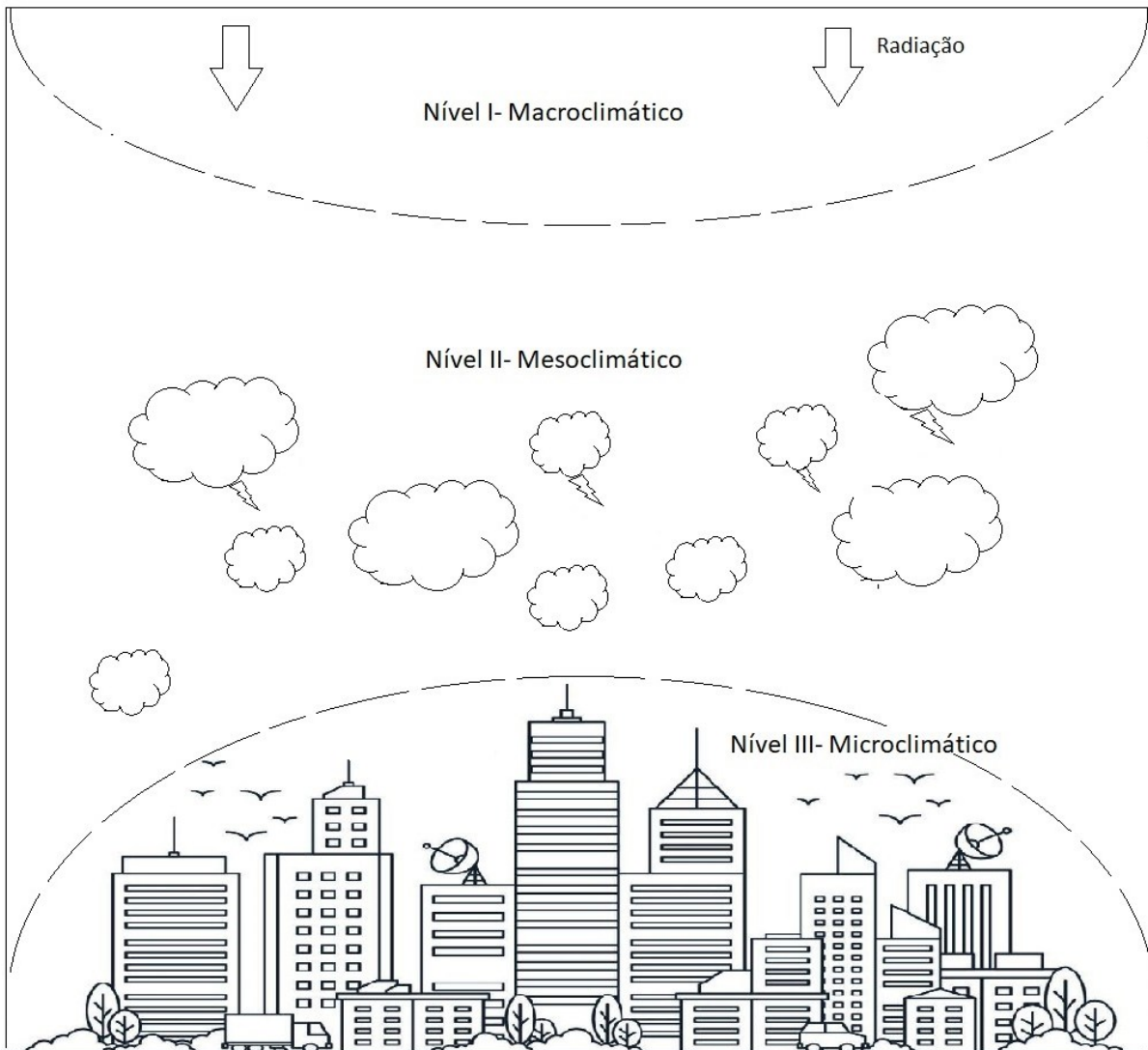
Tomando como referência o conhecimento da ciência geográfica, a escala é um fator de suma importância para o entendimento dos fenômenos dos mais diversos. A escala permite, de forma didática, uma coerência hierárquica no pensamento para a observação dos arranjos espaciais, suas possíveis interações e representações físicas no espaço. Nesse sentido, retomando o olhar para as temáticas do clima, a escala é de suma importância, uma vez que existem ligações interescares que se organizam desde o planeta, passando para o regional, mesoclima, topoclima, chegando até o microclima, que, por sua vez, evidencia a complexidade da relação atmosfera-superfície (Assis, 2010).

Assim, na atmosfera, ocorrem diversos fenômenos que se interagem no tempo e no espaço, tendo comportamentos em extensão horizontal e vertical, bem como possuem duração específica, realizando trocas energéticas como mecanismos de interdependência. Visando compreender, de forma didática, os níveis escalares, Ayoade (1988) realizou uma classificação em três níveis interativos (FIG. 2).

- Nível I- *Macroclimático*: nesta escala, ocorrem as interações entre a energia solar, a curvatura da Terra, os movimentos de rotação e translação.

- Nível II- *Mesoclimático*: nesta escala, ocorrem as interações entre a energia disponível para o processo de evaporação, campos de pressão e as feições do meio terrestre.

- Nível III- *Microclimático*: nesta escala, ocorrem as interações entre os sistemas ambientais particulares na modificação dos fluxos de energia e umidade.

**Figura 2:** Classificação escalar em três níveis interativos

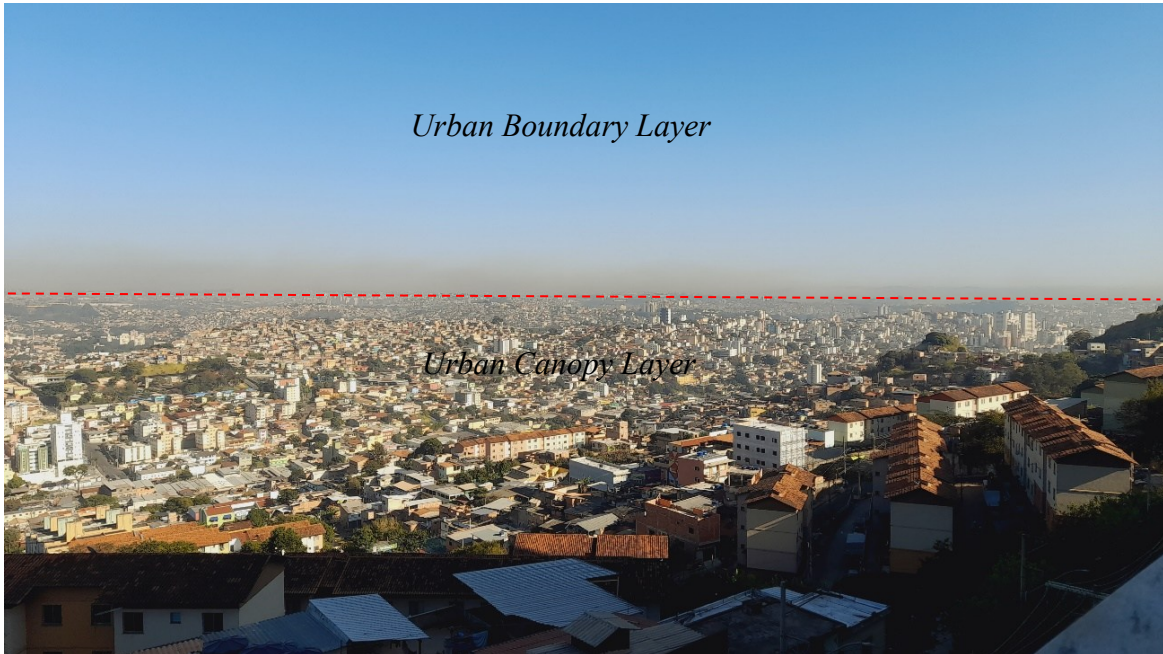
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Tim Oke trabalhou para o desenvolvimento da climatologia urbana no âmbito da *Urban Boundary Layer* (UBL) e *Urban Canopy Layer* (UCL), ambas de escalas micro e topoclimáticas contidas na *Planetary Boundary Layer* (PBL). Para Oke (1978), é de suma importância a delimitação da escala de análise, categorizando-a, por sua vez, em escala horizontal e vertical. Para o autor, existem três escalas preferenciais para estudos do clima urbano as quais ele categorizou em a) mesoescala b) escala local e c) microescala.

Oke (1979), ao subdividir a Camada Limite Planetária em duas porções, permitiu entender a diferenciação entre os processos que ocorrem na micro e na topoescala. A Camada de Cobertura Urbana (*UCL - Urban Canopy Layer*) é a porção da atmosfera entre o nível do solo até a altura média das edificações (FIG. 3). A UCL é fortemente afetada pelas condições locais, sendo caracterizada como nível de escala topoclimática (FIG. 3). A Camada Limite

Urbana (*UBL - Urban Boundary Layer*) é a porção da atmosfera que está acima da UCL, mas ainda dentro da camada-limite planetária, sendo uma camada de escala mesoclimática (Assis, 2010).

**Figura 3:** Desenho esquemático das camadas urbanas sobre o perfil urbano de Belo Horizonte



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Em uma escala distinta de Oke (1979), Monteiro (1990a) descreve que o clima urbano como um sistema que abrange tanto os condicionantes da circulação atmosférica de mesoescala, com exportações de resíduos para fora, quanto as modificações em nível local. Os mesmos fenômenos que caracterizam o mesoclima urbano existem em pequenas escalas por toda a cidade, como pequenas ilhas de calor e de frescor, áreas de desconforto térmico, bolsões de poluição atmosférica e diferenças locais no fluxo de ventos (QUADRO 1).

**Quadro 1:** Categorias escalar do clima e suas estratégias de abordagem

<b>Escalas de tratamento</b>	<b>Espaços climáticos</b>	<b>Espaços urbanos</b>	<b>Meios de observação</b>	<b>Técnicas de análise</b>
1:45.000.000 até 10.000.000	Zonal		Satélites	Caracterização geral comparativa
1:5.000.000 até 2.000.000	Regional		Cartas sinóticas	Redes Transectos
1:1.000.000 até 500.000	Sub-Regional	Grandes áreas urbanas (regiões metropolitanas)	Rede Meteorológica de superfície	Mapeamentos
1:250.000 até 100.000	Local	Área Metropolitana	Rede Meteorológica de superfície	Análise espacial
1:50.000 até 25.000	Mesoclima	Bairros ou porções da cidade	Registros móveis com equipamentos portáteis	Ferramentas específicas e inovadoras
1:10.000 até 5.000	Topoclima	Porções de um bairro ou região específica	Registros móveis com equipamentos portáteis	Ferramentas específicas e inovadoras
1:2.000	Microclima	Conjunto de edificações ou porções ou algum aparato urbano	Instrumentos de medição específicos para ambientes edificados	Ferramentas específicas e inovadoras

**Fonte:** Readaptado de Monteiro (1976).

Os climas locais ou mesoclimas são influenciados pelo tipo de cobertura de solo, pelas superfícies e materiais das edificações e, principalmente, pela emissão de poluentes atmosféricos das mais diversas fontes, estando, assim, intrinsecamente ligados ao clima urbano. O topoclima está relacionado às diferentes formas de exposição da superfície à radiação solar, ao tipo de rugosidade do relevo e aos diferentes tipos de uso do solo. Pode ser identificado a partir da orografia ou de condições topográficas específicas. Por fim, o microclima tem relação escalar com as edificações ou algum aparato urbano como praça, parque urbano, calçada ou quadra.

#### **2.4.2 Camadas atmosféricas**

A troposfera é a camada atmosférica mais próxima da superfície terrestre, com distâncias que podem variar entre 7 km a 16 km de altitude, dependendo da latitude e da época do ano, na qual a temperatura decresce com a altitude e se formam as nuvens e as correntes de convecção (Seinfeld; Pandis, 2006).

De forma conceitual, a troposfera pode ser dividida em duas camadas: a camada limite planetária – CLP (*Planetary Boundary Layer – PBL*), ou Camada Limite Atmosférica -CLA, e a Atmosfera Livre- AL. A espessura da CLP varia de dezenas de metros na superfície até por volta de 1km. Normalmente, é definida em função da turbulência causada pela taxa de aquecimento ou de resfriamento da superfície, força dos ventos, rugosidade superficial, características topográficas da região, movimentos verticais de grande escala, advecção horizontal de calor e umidade, dentre outros (Arya, 2001).

Assim, a CLP pode ser definida como a porção da troposfera diretamente influenciada pela superfície terrestre e responde às forçantes superficiais (térmica ou mecânica) em uma escala temporal com duração de poucas horas (Stull, 1988).

Nesse sentido, a circulação atmosférica, tanto em escala sinótica (larga escala) quanto em escala local, está condicionada pela representação dessa camada, que apresenta um elevado número de eventos e promove o transporte de calor, massa em dado momento temporal, bem como concentra os principais poluentes atmosféricos gerados na superfície pela ação humana, bem como aqueles gerados pela natureza.

Logo nos primeiros minutos após o nascer do Sol, a superfície terrestre começa a ser aquecida pela radiação solar. Depois de pouco tempo, esse calor começa a ser transferido para o ar sobrejacente, provocando uma mistura turbulenta do ar que será responsável por ‘dissolver’ a camada de inversão formada no período noturno. Dada a importante contribuição da energia solar, essa nova camada que é formada nas primeiras horas da manhã denomina-se por Camada de Mistura (CM) ou Camada Limite Convectiva (CLC), que é delimitada superiormente por uma camada denominada de entranhamento.

Assim, a Camada de Mistura tem um importante papel na manutenção da qualidade do ar de uma região, pois ela funciona como um mecanismo de diluição dos poluentes atmosféricos ao promover a troca de ar “mais limpo” com o ar “mais sujo”, possibilidade de novas entradas no sistema. Quanto maior quantidade de energia no sistema, mais instável e caótica a atmosfera fica, maior se torna verticalmente a CM, o que lhe confere mais capacidade de trocas no sistema e aumento de sua eficiência. Nesse sentido, a Camada de Mistura é um importante elemento de análise quando se tem como objeto de pesquisa estudar eventos de poluição atmosférica.

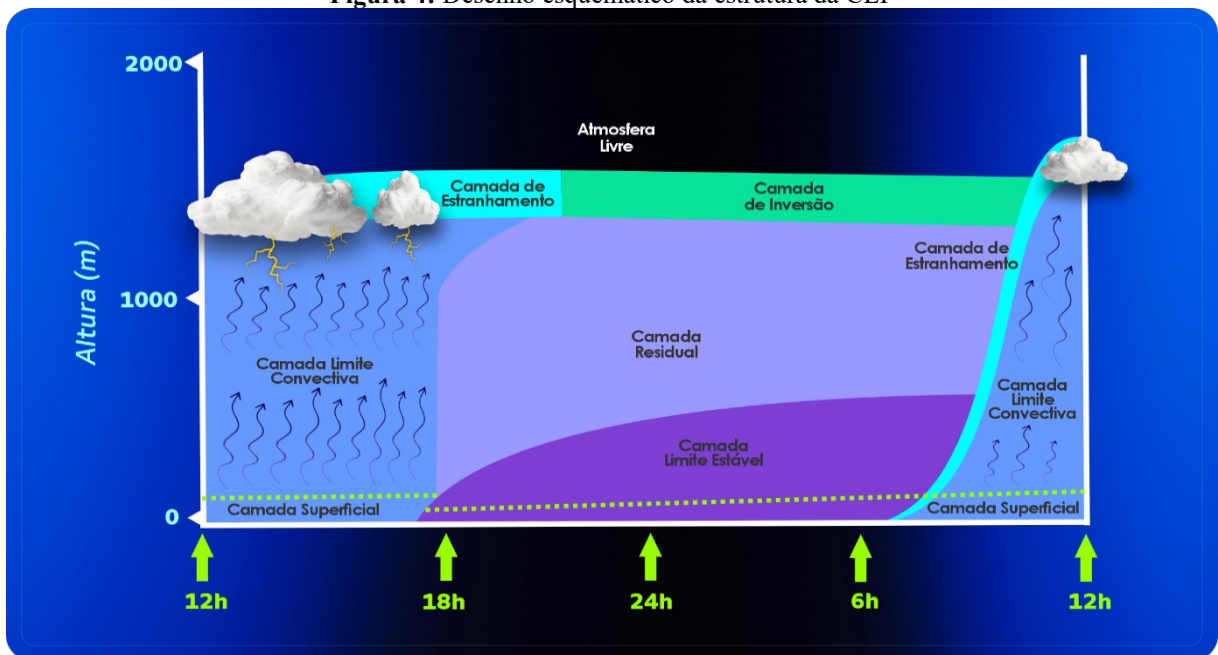
Durante o decorrer do dia, as correntes ascendentes ou térmicas intensificam-se, provocando o crescimento da Camada de Mistura e, assim, a formação de nuvens, que podem ser seguidas de pancadas de chuva, a depender das condições de umidade disponível na atmosfera. Assim, ao anoitecer, inicia-se o processo inverso, agora, de desenvolvimento da Camada Limite Estável (CLE), que alguns autores denominam de Camada Limite Noturna

(CLN), devido ao resfriamento da superfície terrestre que não mais interfere com instabilidade atmosférica. É importante ressaltar que esse fenômeno naturalmente ocorre ao longo de um dia, desde que não esteja obviamente sobre influência de uma massa de ar fria, o que faz com que o sistema se “neutralize” (FIG.4).

Acima da CLE, existe a Camada Residual (CR) que, por sua vez, é uma camada remanescente da CM e, apesar de haver a diminuição do desenvolvimento das correntes convectivas, a influência dos ventos em altitude pode provocar turbulências noturnas, entretanto em menor magnitude como as observadas na CM (FIG.4).

Por fim, tem-se a circulação da Camada Superficial (CS) que é a região inferior da CLP, na qual os fluxos turbulentos e o cisalhamento do vento são considerados constantes, pois variam menos de 10% da sua magnitude (Stull, 1988). Para Arya (2001), na CS a rotação da Terra ou a força de Coriolis pode ser ignorada nos modelos numéricos. Nesse âmbito, a CS é o meio no qual os seres humanos vivem e funciona como fonte de fricção, pois é capaz de modificar os campos de vento e os processos de transferência entre a superfície terrestre e a CM. Assim, como na CLE a CS, apesar de haver diminuição do desenvolvimento das correntes convectivas, a influência dos ventos pode provocar turbulências noturnas. Quando essas turbulências noturnas acontecem são fortemente condicionadas pelo tecido e rugosidade urbana.

**Figura 4:** Desenho esquemático da estrutura da CLP



Fonte: Adaptado de Stull (1988).

Wagner e Schäfer (2017) relataram uma forte correlação entre as concentrações de poluição e a altura da camada limite ou camada de mistura. As temperaturas quentes relacionadas às Ilhas de Calor em áreas urbanas fortalecem a mistura turbulenta e aumentam a altura da camada limite urbana (Fallmann *et al.*, 2016). Nos estudos, Sarrat *et al.* (2006) descobriram que a camada limite urbana de Paris era duas a três vezes maior que a rural de entorno. Segundo Li *et al.* (2018) a forte turbulência aumenta a dispersão de partículas de aerossol dentro de uma camada limite mais profunda, diminuindo as concentrações de aerossóis em áreas urbanas e enfraquecendo a intensidade da poluição próximo à superfície.

Em geral, à noite, as partículas da atmosfera rural normalmente ficam presas em uma camada próxima à superfície, devido à inversão de temperatura (Oke, 1995). Embora ainda exista uma camada de mistura abaixo da inversão de temperatura na atmosfera, devido à liberação da energia armazenada na superfície urbana, a mistura turbulenta pode enfraquecer o acúmulo de partículas de aerossol no plano próximo ao solo à noite, diminuindo as concentrações noturnas de aerossóis nos níveis mais inferiores (Li *et al.*, 2018).

### ***2.4.3 Componentes de formação do clima urbano***

Os ambientes urbanos são sistemas complexos por si só, com entrada e saída de fluxos de energia e de massa, caracterizados por um contínuo processo de mudanças e de interações que muitas vezes são difíceis de compreender. Na busca de compreender esses fenômenos sobre a atmosfera urbana, vários estudos com um olhar especial sobre a climatologia urbana se dedicaram a desvendar esses fenômenos nas últimas décadas.

Alguns desses estudos apontam que a concentração de áreas construídas e verticalizadas no tecido urbano são responsáveis por alterações no comportamento dos parâmetros meteorológicos nas cidades. Os espaços atualmente ocupados por grandes estruturas edificadas com introdução de elementos como o aço, ferro, concreto e asfalto, associados à presença de poluentes, criam condições que alteram as propriedades da baixa troposfera e, conseqüentemente, do clima local, constituindo, assim, uma climatologia completamente diferenciada dos ambientes naturais.

Uma das dificuldades enfrentadas pelos pesquisadores na temática clima urbano é a adoção de metodologias adequadas ou mesmo modelos teóricos capazes de representar fielmente os inúmeros problemas práticos enfrentados em situações reais, isto porque não é possível levar o clima para o laboratório de teste em ambiente controlado. Além disso, o clima urbano se aproxima muito dos chamados “sistemas complexos”, justamente por se tratar de um

fenômeno físico, químico, social, geográfico, econômico, topográfico arquitetônico, condicionado fortemente pelos fenômenos de mesoescala da atmosfera e ainda de escala planetária (fenômenos astronômicos).

Mediante os desafios postos sobre o clima urbano tem-se como destaque a obra do climatologista Monteiro, (1976) denominada de *Teoria e Clima Urbano*. Na sua tese, Monteiro buscou conceber, de forma muito didática, uma classificação taxonômica das diversas escalas de abordagem, a que chamou Sistema Clima Urbano (SCU).

O Sistema Clima Urbano importa energia através do seu ambiente, é sede de uma sucessão de eventos que articulam diferenças de estados, mudanças e transformações internas, a ponto de gerar produtos que se incorporam ao núcleo e/ou são exportados para o ambiente, configurando-se como um todo de organização complexa que se pode enquadrar na categoria dos sistemas abertos (Monteiro, 1976, p.96).

Para Monteiro (1976), o clima urbano deve ser compreendido como o clima de um dado espaço geográfico, porém associado ao seu processo de urbanização, que, por sua vez, revela as condições atmosféricas resultantes da interação de diferentes escalas climáticas. Para o autor, a observação do clima urbano deveria ser sempre acompanhada da análise das características físicas do meio geográfico, ambientais, dos processos de urbanização desses espaços e das questões sociais. Somente com esse olhar sistêmico, seria possível identificar suas interações e os fenômenos que o revestem.

A visão organísmica e as implicações cibernéticas no S.C.U são capazes de refletir a co-participação da natureza e do homem na elaboração do clima da cidade. Essa visão nos habilita à compreensão de que o insumo energético não determina o conjunto-padrão do clima urbano, necessitando da ação transformadora da estrutura (Monteiro, 1976, p.124).

Monteiro (1976) ainda chama a atenção para a importância de entender a estrutura interna do Sistema Clima Urbano não como uma simples superposição ou adição de suas partes (topografia, uso do solo, morfologia, funções e fatores de meso e larga escala), mas somente por meio da íntima conexão entre elas. Atrelado a essa premissa, ele também aponta para a necessidade de se ter um olhar cuidadoso para a dinâmica e a variabilidade têmporo-espacial, pois os ambientes urbanos são um sistema aberto que pode, por sua vez, sofrer interferências naturais ou antrópicas nos fluxos de energia vindos sobre diversas formas de *input*.

Nesse âmbito, considera-se que o SCU se trata de um sistema aberto, com intensas trocas de matéria e energia, entre os ambientes urbanos e seu entorno. Os sistemas abertos não sobrevivem em estado de isolamento, eles se mantêm por meio de um contínuo fluxo de

entradas e saídas (*input e output*) de energia, nunca estando em um estado de perfeito equilíbrio, mas sempre em busca.

Em sua obra, Monteiro (1976) introjeta a ideia da necessidade de associação à percepção humana, criando os subsistemas associados ao SCU, os quais denominou de *canais de percepção do clima*. Nesse sentido, ele propôs três canais de percepção i) subsistema termodinâmico: relacionado ao conforto térmico; ii) subsistema físico-químico: atrelado à qualidade do ar; e iii) subsistema hidrometeorológico: que diz respeito ao impacto meteorológico. Esses três canais serão melhor apresentados abaixo (QUADRO 2).

**Quadro 2:** Sistema Clima Urbano: articulações dos subsistemas segundo os canais de percepção

<b>Subsistemas Canais</b>	<b>Termodinâmico Conforto Térmico</b>	<b>Físico-Químico Qualidade do Ar</b>	<b>Hidrometeorológico</b>
Fonte	Atmosfera, radiação e circulação horizontal	Atividade humana (circulação de veículos automotores e indústrias)	Atmosfera, estados especiais (anomalias e desvios rítmicos)
Trânsito no Sistema	Intercâmbio de operador e operando	De operando ao operador	Do operador ao operando
Mecanismo de Ação	Transformação no sistema	Difusão por meio do sistema	Concentração no sistema
Desenvolvimento	Contínuo (permanente)	Cumulativo (renovável)	Episódio (eventual)
Produtos	Ilha de Calor Ventilação Aumento de Precipitação	Poluição do ar	Ataques à integridade urbana
Efeitos	Desconforto e redução do desempenho humano	Problemas sanitários, doenças respiratórias, oftalmológicas etc.	Problemas de circulação e comunicação urbana

**Fonte:** Adaptado de Monteiro, 1976, p.127.

Com base no QUADRO 2, é possível perceber que o SCU é caracterizado por vários graus de hierarquia funcional e diferentes níveis de resolução, estando estes últimos ligados à

percepção humana. Dessa forma, seriam estabelecidos os citados canais de percepção associados aos principais níveis de resolução dos sistemas, separando, assim, os grandes conjuntos de fenômenos dentro do universo climático.

### **i)Componente Termodinâmico**

A principal entrada de energia no SCU é de natureza térmica, ou seja, advinda da radiação solar incidente sobre o Terra, impondo sobre os ambientes urbanos os mesmos componentes dinâmicos da Circulação Geral da Atmosférica, que, por sua vez, também são decisivas para a componente hidrometeorológica (Monteiro, 1976, p.97).

Oke *et al.*, 2017 lembram que a radiação solar (principal componente termodinâmico) pode aumentar as concentrações de poluentes secundários mediante reações fotoquímicas com poluentes primários, produzindo o conhecido smog fotoquímico. O fenômeno ocorre principalmente em grandes cidades que possuem elevado número de veículos motorizados com climas ensolarados, quentes, secos.

Com base nessa concepção, entende-se que a estrutura urbana, por meio dos materiais construtivos utilizados, da verticalização, do uso do solo e da densidade de ocupação, altera os fluxos normais de reflexão, absorção e armazenamento de energia, alterando o ritmo natural de ganho e perda de calor, gerando por fim, anomalias térmicas e higrométricas.

A geometria das edificações (adensamento, padrões construtivos e natureza dos materiais) possui características que impedem a perda natural de energia, fazendo com que o resfriamento atmosférico seja menos eficiente. Com maior radiação de ondas longas emitidas pela superfície, a atmosfera nos ambientes urbanos fica sujeita aos reflexos de todo o calor armazenado, alterando o ritmo de ganho e perda de energia, gerando, por exemplo, as ilhas de calor e noites mais quentes.

**Figura 5:** Imagem da região adensada do Bairro Buritis e da região menos adensada da Pampulha



**Fonte:** Créditos de Marco Paulo Bahia Diniz. Portal Belo Horizonte.

O fluxo natural de entrada de energia no sistema urbano aliado às atividades humanas como elementos de modificação da superfície natural geram algumas mudanças no balanço de radiação, com importantes implicações sobre a temperatura no tecido urbano em áreas circunvizinhas, chamadas ilhas de calor ou bolsões de calor (Assis, 2010).

As modificações no balanço de radiação dos ambientes urbanos diminuem a inércia térmica desses espaços quando comparada à inércia térmica do entorno (porção rural), isso ocorre, principalmente, por intermédio da ampliação da densidade de ocupação dos espaços urbanos, pela diferença de calor específico existente entre os materiais naturais e os materiais artificiais. Na física, a inércia é considerada como a força que limita a aceleração de um objeto, logo, a inércia térmica pode ser entendida como a força que limita o aquecimento de determinada superfície, sendo que quanto maior for a inércia térmica, menor será a sua variação de temperatura. (Junior; Amorin, 2016).

Calor específico é uma característica de cada tipo de material e indica o comportamento da substância quando exposta a uma fonte de calor (quantidade de calor necessária para que cada grama de uma dada substância sofra uma variação de temperatura correspondente a 1°C). Nesse prisma, fica evidente que a substituição de materiais naturais com menor calor específico por materiais construtivos com maior calor específico, certamente, irá gerar maior aquecimento da superfície.

Portanto, entende-se que a mesma quantidade de energia (energia solar) incidente em dois sistemas (rural e urbano) irá causar maior aquecimento na superfície urbana se comparada à superfície rural de maneira geral. Nesse sentido, fica evidente que a alteração do balanço de energia sobre os ambientes urbanos tem alta capacidade de provocar anomalias térmicas nesses locais.

Assim, fica evidente que o resultado do impacto sobre o sistema térmico das cidades também possui reflexos nas alterações higrométricas provocadas pela urbanização que, ao potencializarem o aquecimento da superfície, diminuem a umidade nos espaços urbanos, alteram evaporação e a evapotranspiração, o que reduz a perda de energia por intermédio da transformação do calor sensível em calor latente. Essas alterações no balanço térmico desses ambientes chegam até interferir na dinâmica das nuvens com consequências importantes na formação do clima das cidades, conforme pode ser visto a seguir (Assis, 2010).

Estudos recentes realizados por Li *et al.* (2018) e Ulpiani (2021) relatam que o aumento da temperatura do ar pode enfraquecer as “ilhas de poluição urbana<sup>6</sup>” devido ao aumento da

---

<sup>6</sup> Ilhas de Poluição Urbana – IPU: ver conceito no capítulo 1.5.2 a seguir.

altura da camada limite, favorecendo a dispersão dos poluentes, enquanto Li *et al.* (2020a) observaram o oposto com menores temperaturas ao longo dos seus estudos na China.

Em contrapartida, o estudo realizado por Ngarambe *et al.* (2021), na Correia do Sul, identificou que o aumento na temperatura possui potencial de aumentar a poluição do ar. Segundo o estudo realizado, o aumento de 1°C na IICU na área urbana de Seul causou um aumento nas concentrações de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub> em 0,001 ppm, 0,01 ppm, 0,1 ppm, 3µg/m<sup>3</sup> e 2µg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Não se pode esquecer que o componente termodinâmico está inserido dentro do sistema de circulação atmosférica, por meio dos ventos locais e regionais que influenciam sistematicamente o clima urbano, conforme já apontado no capítulo anterior (1.4.2).

Como já visto no capítulo anterior, durante o decorrer do dia, as correntes ascendentes ou térmicas intensificam-se, provocando o crescimento da Camada de Mistura e, assim, a formação de nuvens, que podem ser seguidas de pancadas de chuva, a depender das condições de umidade disponível na atmosfera. Ao anoitecer, inicia-se o processo inverso, agora, de desenvolvimento da Camada Limite Estável (CLE) ou Camada Limite Noturna (CLN), devido ao resfriamento da superfície terrestre que não mais interfere com a injeção de energia no sistema.

Por fim, tem-se a camada mais próxima ao solo denominada de Camada Superficial (CS), na qual os fluxos turbulentos e o cisalhamento do vento são considerados constantes. É nessa camada superficial que ocorrem também as alterações no tecido urbano (morfologia), capaz de modificar os campos de vento e os processos de transferência entre a superfície terrestre e a Camada de Mistura. Assim como na CLE, na CS, apesar de haver diminuição do desenvolvimento das correntes convectivas, a influência dos ventos pode provocar turbulências noturnas. Quando essas turbulências noturnas acontecem são fortemente condicionadas pelo tecido e pela rugosidade urbana.

Ulpiani (2021) realizou uma revisão bibliográfica da relação entre poluição e ilhas de calor e relatou que, em cidades costeiras, como Tóquio e Brisbane, a brisa advinda do fenômeno terra-mar pode controlar a poluição. Segundo o estudo, durante a noite, a brisa dirige-se da terra ao mar, arrastando os poluentes para fora da cidade. Durante o dia, ocorre o efeito oposto, e os ventos procedentes do mar levam os poluentes urbanos residuais acumulados previamente sobre a camada limite marítima para dentro da cidade.

No entanto, o efeito mitigador ou potencializador da circulação dependerá da sua direção em relação à zona urbanizada, uma vez que a advecção pode transportar poluentes oriundos tanto de fontes naturais como de fontes industriais situadas em áreas contíguas aos

centros urbanos. Assim, Park *et al.*(2010) concluíram que valor anual mais alto de MP<sub>10</sub> em Seul foi de 70,4 µg/m<sup>3</sup> no ano 2002, proveniente dos ventos oriundos da China que chegaram carregados de poluentes.

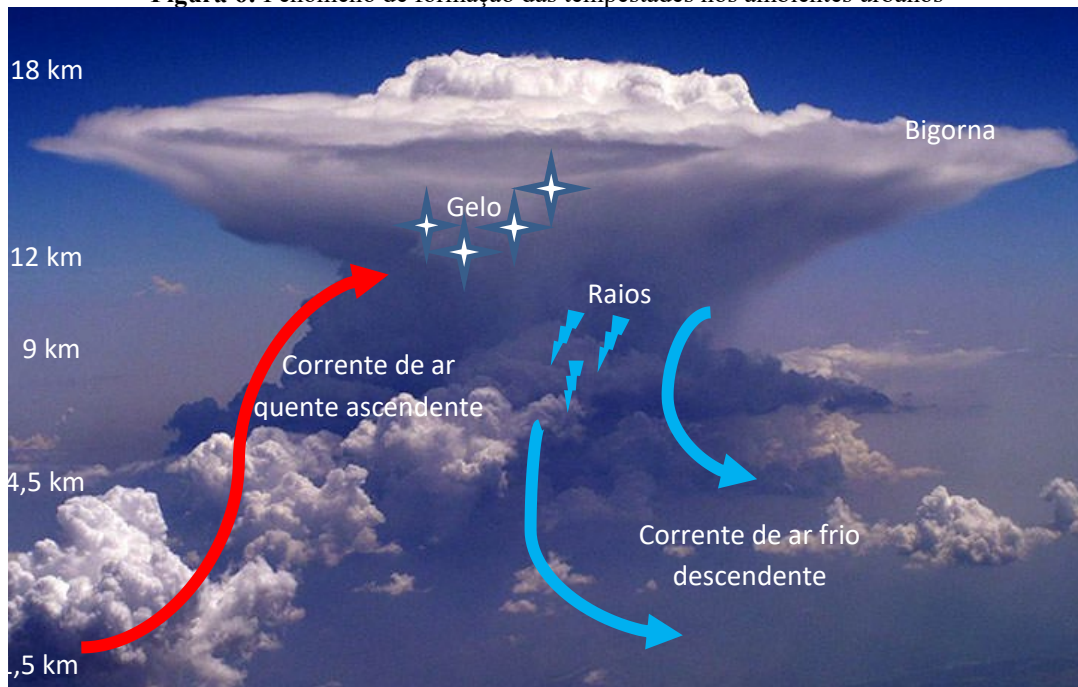
## **ii)Componente Hidrometeorico**

A precipitação nos ambientes urbanos tem sido motivo de grande preocupação nas últimas décadas, uma vez que o fenômeno tem trazido consequências danosas para a sociedade advindo das tempestades e suas intercorrências.

Assim, aparentemente, apresenta-se contraditório o fato de que a umidade relativa do ar seja menor dentro do tecido urbano, dada a ausência ou carência de vegetação e a presença de massas d'água significativas, ainda assim a precipitação seja elevada nas áreas urbanas em muitas regiões. Entretanto, ao verificar a capacidade térmica dos ambientes urbanos, é possível perceber que adquirem maior competência de dispende energia acumulada capaz de mover vapor de água para altitudes mais elevadas com maior eficiência.

Contudo, é importante mencionar que nem sempre é possível estabelecer uma relação direta entre a urbanização e o aumento das chuvas, pois elementos como morfologia local e sistemas sinóticos mais ou menos atuantes influenciam esse parâmetro a ponto de torná-lo mínimo ou mesmo de anular os efeitos antrópicos desse fenômeno hidrometeorico (Assis, 2015).

A formação dos Sistemas Convectivos de Mesoescala- SCM, que são constituídos por aglomerados de nuvens, carregados de alta umidade, ao se interagirem com os ambientes urbanos que apresentam acúmulo de energia, favorece a formação vertical de nuvens maior que o comum, o que ocasiona chuvas rápidas comumente nos finais de tarde na forma de tempestades nas áreas urbanas em especial.

**Figura 6:** Fenômeno de formação das tempestades nos ambientes urbanos

**Fonte:** Elaborado pelo próprio autor.

As nuvens se formam a partir da condensação do vapor d'água existente na atmosfera. Dada a quantidade de energia dos ambientes urbanos, o vapor de água nessas áreas possui maior capacidade de ganhar elevadas altitudes. Ao subir rapidamente, a temperatura do vapor de água cai e as gotículas adquirem temperaturas agora bem menores (em torno de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $-20^{\circ}\text{C}$ ), podendo, nesse momento, tornar-se partículas de gelo (FIG.1.6).

É nesse cenário que o componente hidrometeorológico dentro do SCU se difere dos demais, ao potencializar a formação de grandes núcleos convectivos, em especial no final das tardes. O efeito final desse fenômeno retorna aos ambientes urbanos na forma de riscos sociais por meio de inundações, de deslizamento e de desmoronamentos advindos de grandes tempestades.

Do ponto de vista da poluição atmosférica, a formação de tempestades ou chuvas torrenciais também funcionam como mecanismos de atenuação da poluição ao retirarem as partículas de gases ou de poeiras suspensas da atmosfera por meio do fenômeno de solubilidade e higroscopicidade do elemento, funcionando como uma lavagem da atmosfera ao promover a remoção físico-química.

Zhang *et al.* (2015) realizaram um estudo na cidade de Pequim, demonstrando os efeitos do período de chuva nas concentrações de  $\text{MP}_{2,5}$  e  $\text{O}_3$  antes, e observaram que as concentrações de  $\text{MP}_{2,5}$  e  $\text{O}_3$  diminuíram aproximadamente  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em períodos de chuva fraca. Em períodos de chuva intensa, a redução de  $\text{MP}_{2,5}$  passou para  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo que para o  $\text{O}_3$  não houve redução significativa ( $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Li *et al.* (2020a) observaram que, durante o inverno, período de precipitação leve na Alemanha, a poluição urbana é mais intensa em Berlim, variando entre 5 e 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  em comparação com o verão, que teve variações entre 3 e 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , quando ocorrem as maiores precipitações.

Por fim, no Brasil, Sánchez-Ccoyllo e Andrade (2002) observaram que as concentrações médias de  $\text{MP}_{2,5}$  na cidade de São Paulo foram mais baixas, cerca de 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , em eventos de chuva mais significativas do que em períodos secos, nos quais a concentração para esse poluente foi de 85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando que a chuva promove uma importante redução da poluição de  $\text{MP}_{2,5}$  na cidade de São Paulo.

### **iii) Componente Físico-Químico:**

Outro elemento importante que compõe o SCU é a qualidade físico-química da atmosfera, referenciada muitas vezes pela terminação “poluição”. As propriedades físico-químicas na baixa troposfera são expressas em termos qualitativos, quantitativos e, também, possuem variação temporal e espacial. Contudo, os componentes físico-químicos não são formados apenas por elementos antropogênicos, por meio dos processos de emissões urbanas, industriais e de queima da biomassa (Fuzzi *et al.*, 2006), uma vez que existem importantes contribuições naturais.

Os componentes físico-químicos naturais são partículas líquidas ou sólidas suspensas na atmosfera geralmente com dimensões inferiores a 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro e que são originados por poeira do solo, emissões de vulcões, partículas de pólenes, sais marinhos, aerossóis secundários entre outros (Alves, 2005).

As partículas de aerossóis atmosféricos podem ser compostas por diversos elementos químicos, tais como: sulfatos, nitratos, amônios, alguns tipos de carbono, sais marinhos, minerais como (Al, Ca, Fe, Si etc.), metais pesados (Pb, Cu, Cr etc.) e água.

Os aerossóis podem ser divididos em primários e em secundários, de acordo com o seu processo de formação. Os aerossóis primários são aquelas partículas emitidas diretamente para a atmosfera, enquanto os secundários são formados na atmosfera por processos físicos (condensação, nucleação e evaporação) e químicos (oxidação e fotoquímica), principalmente pelo processo de conversão gás-partícula (Alves, 2005; Seinfeld; Pandis, 2006).

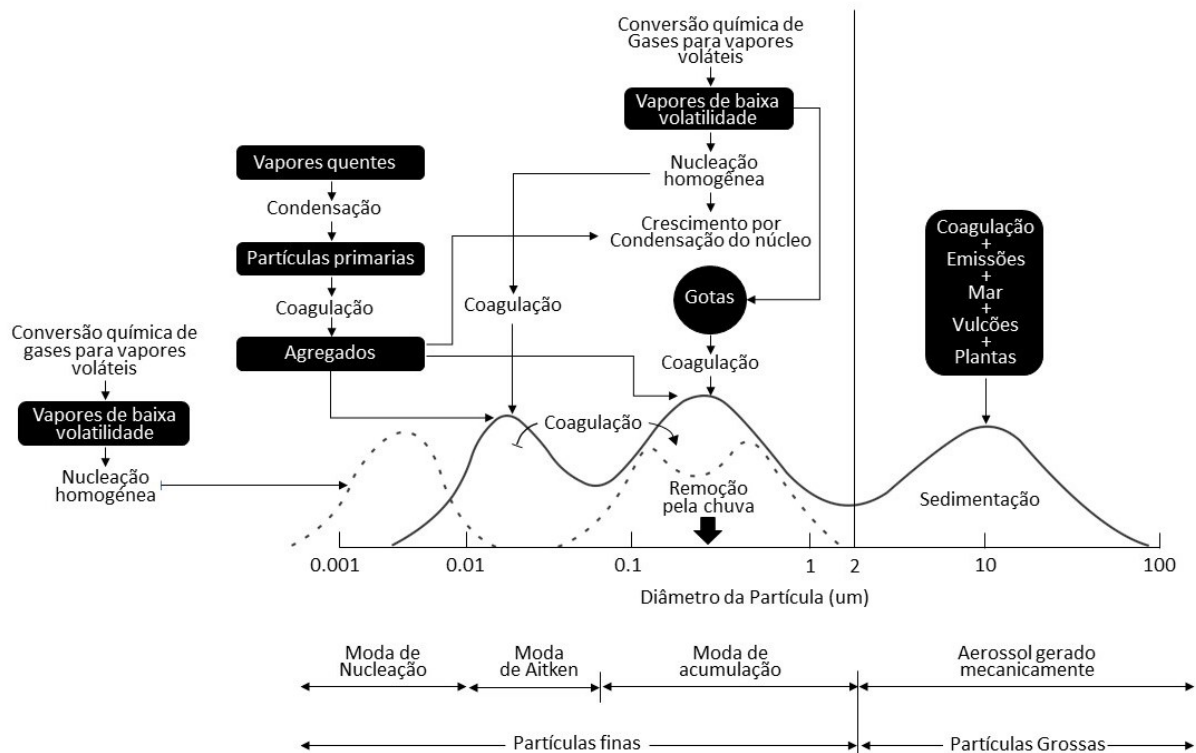
Os tamanhos das partículas de aerossóis podem variar desde alguns nanômetros até dezenas de micrômetros de diâmetro. Whitby *et al.* (1976), citado por Seinfeld e Pandis (2006), realizaram uma classificação dos materiais particulados de acordo com o seu diâmetro, chegando a divisão em quatro grupos, sendo estes: i) a moda de nucleação, ii) moda Aitken; iii)

moda de acumulação e iv) moda grossa ( $d > 2,5\mu\text{m}$ ). Sendo os três primeiros as partículas finas e o último as partículas grossas (Seinfeld; Pandis, 2006).

Conforme pode ser observada (FIG. 7) a seguir, a moda de nucleação e Aitken são formadas por condensação de vapores quentes durante os processos de combustão e da nucleação de espécies atmosféricas para formar novas partículas. Ademais, as partículas de nucleação e Aitken são comumente chamadas de partículas ultrafinas. As partículas da moda de acumulação são formadas a partir da coagulação das partículas menores de modas inferiores (nucleação e Aitken), assim como pelo aumento da condensação de vapores em partículas existentes.

Por fim, as partículas de moda grossa são formadas em geral por processos mecânicos e compreendem as emissões de origem biogênica naturais, como vulcões, de plantas, do solo e do mar (Seinfeld; Pandis, 2006; Boucher *et al.*, 2015).

**Figura 7:** Esquema da distribuição de tamanhos dos aerossóis atmosféricos e os processos que influenciam cada fração de tamanho de partículas



**Fonte:** Readaptada e extraída de Seinfeld e Pandis, 2006.

Existem dois processos relacionados ao aumento do diâmetro do tamanho do aerossol, sendo a *coagulação* um destes. Tal fenômeno consiste na junção entre partículas, dando origem a uma “única partícula”, conservando, assim, a massa das partículas unidas, mas diminuindo o número de partículas na atmosfera.

Contudo, o mais comum e importante mecanismo de crescimento dos aerossóis é a condensação, que consiste no crescimento da partícula a partir de vapores que condensam sobre a superfície de aerossóis existentes. Esse processo é dado em função da pressão de vapor de saturação e da área de superfície das partículas existentes (Holmes, 2007).

Segundo Seinfeld e Pandis (2006), os aerossóis têm um período de residência muito curto na atmosfera que pode variar de alguns dias ou no máximo poucas semanas. Após essas partículas de aerossóis serem emitidas para a atmosfera, elas passam por transformações físico-químicas, ou seja, possuem um tempo de vida (crescimento e envelhecimento).

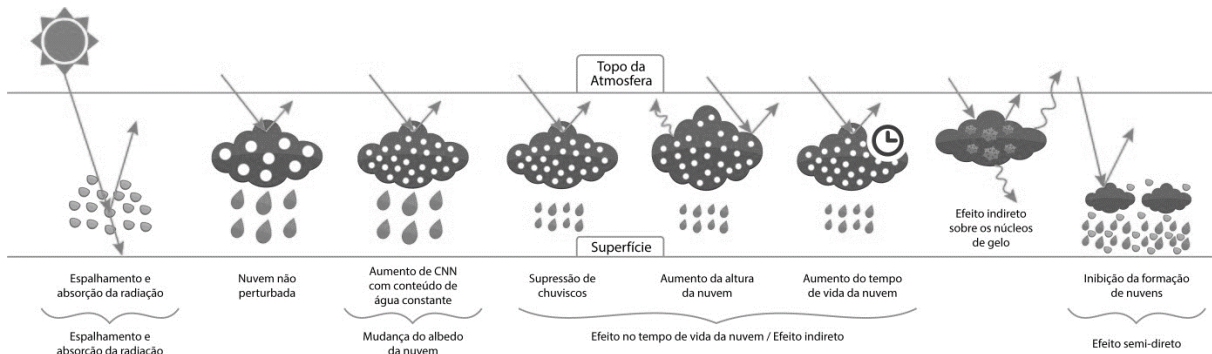
A retirada natural dos aerossóis da atmosfera se dá pelo processo de deposição, que pode ser na forma seca ou úmida, sendo responsável por tornar a atmosfera mais limpa. A eficiência da retirada das particulados da atmosfera depende fortemente das propriedades físicas e químicas do material particulado, de suas características na forma de partículas ou gasosa, do tamanho das partículas, da solubilidade em água e da higroscopicidade. Além disso, também depende das características da região, tais como a quantidade de chuva disponível e o uso do solo (asfalto, concreto, solo desnudo ou vegetado, existência de florestas tropicais ou não).

A deposição seca é um processo pelo qual o material particulado presente na atmosfera é sedimentado por impactação inercial - em geral por partículas mais grossas - ou difusão turbulenta - partículas mais finas - (Wesely; Hicks, 2000). Já a deposição úmida está relacionada com a interação dos aerossóis com os vapores d'água na atmosfera por meio do mecanismo de eliminação das partículas de aerossóis a partir da lavagem física da atmosfera (Seinfeld; Pandis, 2006).

Ao realizar a limpeza da atmosfera, o contato entre os materiais e a água precipitada pode facilitar a dissolução dos principais poluentes, contribuindo para uma possível acidificação da chuva, dada a presença de nitratos e sulfatos disponíveis nesse material.

Os aerossóis ainda exercem um papel importante no sistema climático e produzem efeitos tanto em escala global quanto local. As partículas de aerossóis espalham e absorvem radiação solar e terrestre e, assim, alteram o balanço radiativo da atmosfera. Os efeitos ópticos são fortemente regulados pela umidade relativa, porque os componentes higroscópicos absorvem a água, alterando o diâmetro das partículas e os índices de refração.

**Figura 8:** Readaptação do diagrama esquemático dos efeitos radiativos dos aerossóis.



Fonte: IPCC, 2007.

## 2.5 Poluição Urbana

### 2.5.1 Principais fontes emissoras e seus efeitos sobre o tecido urbano

Nas áreas urbanas, as principais fontes antropogênicas de poluição do ar são essencialmente o tráfego de veículos, bem como a atividade industrial, quando existente. Como as cidades vêm cada vez mais aumentando sua população, o crescimento contínuo do número de veículos que circula nas vias de tráfego das cidades também vem aumentando vertiginosamente e tendo como consequências o aumento da poluição nos centros.

A quantidade de megacidades no mundo e o tamanho das suas populações aumentaram significativamente na segunda metade do século XX (Baklanov *et al.*, 2016), especialmente nas últimas seis décadas, de 751 milhões para 4,2 mil milhões em 2018, representando 55% da população mundial (ONU, 2018). Essas regiões densamente povoadas são responsáveis por uma quantidade significativa de poluentes emitidos para a atmosfera que não permanecem necessariamente em regiões urbanas e podem ser transportados por grandes distâncias, dependendo do tipo de substância, condições climáticas, características topográficas etc., contribuindo para a concentração de fundo em todo o hemisfério (Baklanov *et al.*, 2016).

Estudos como de Riojas-Rodríguez *et al.* (2016) avaliaram o monitoramento das concentrações anuais (de acordo com os últimos registros oficiais das autoridades ambientais) e os padrões para material particulado (PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>) na América Latina. O resultado do estudo indicou que dos 33 países investigados, apenas 17 apresentaram algum tipo de informação sobre partículas, ou seja, apenas 20% da população dessas regiões vive em cidade com monitoramento da qualidade do ar.

Zhu *et al.* (2020) analisaram as concentrações do MP<sub>2,5</sub> em 346 cidades da China, mediante observações de satélite, e relataram que o fenômeno ocorre em 218 cidades, com uma diferença média anual nas concentrações entre a área urbana e rural de 11,3 µg/m<sup>3</sup>. Li *et al.* (2020a) investigaram as variações diurnas do MP<sub>10</sub> mediante uma rede de monitoramento do ar, composta por três tipos de estações. Os autores observaram que as concentrações médias anuais do MP<sub>10</sub> nas estações rurais, fundo urbano e de tráfego foram de 19,8 µg/m<sup>3</sup>, 23,6 µg/m<sup>3</sup> e 28,6 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente, sendo as concentrações nas estações de fundo urbano e rural muito mais baixas durante o dia do que a noite, devido ao desenvolvimento de uma camada limite mais turbulenta.

Segundo a *Central Pollution Control Board - CPCB* (2012), citado por Whitelegg; Haq, (2003), a poluição veicular contribui com 72% da poluição do ar nas cidades urbanas quando comparadas à poluição industrial (20%), seguida da doméstica (8%). Dentro dos grandes centros urbanos, nos ambientes de tráfego intenso, cerca de 80% a 90% desses poluentes é resultado da emissão veicular, essa situação é particularmente grave em cidades de países em desenvolvimento (Whitelegg; Haq, 2003).

Segundo Agência de Proteção Ambiental dos Estados – USEPA (2010), citado por Sutanto *et al.* (2005), os veículos rodoviários são responsáveis por 74% das NO<sub>x</sub> e 94% das emissões de fumaça preta. Na Indonésia, 70% da poluição do ar é devido à atividade de transporte e 30% vêm da atividade industrial (Sutanto *et al.* 2005).

De acordo com o último Balanço Energético Brasileiro, desde 1973, o setor de transportes é o principal consumidor de derivados de petróleo e de gás natural, como diesel e gasolina. Os dados apontaram que, em 2019, esse setor consumiu 61.370.000 (tonelada equivalente de petróleo), sendo que 90,8% desse consumo se destinaram ao transporte rodoviário, o que representa aproximadamente 69% do consumo total da energia que o Brasil consumiu proveniente desses combustíveis.

O Brasil é o único país do mundo no qual desde 1975 se utiliza elevado teor de etanol como combustível na sua frota regular nas cidades. No ano de 1975, houve um importante Programa Nacional do Alcool (Pró Alcool), com objetivos específicos de reduzir a dependência do país das importações de petróleo. Porém, um efeito prejudicial desse programa foi o aumento da área de cultivo de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, um aumento de áreas de vegetação natural, especialmente mata atlântica e cerrado. A queima de biomassa no processo de colheita resultou em uma piora na condição da qualidade do ar que tem impactos até hoje sobre muitas regiões polo de cana-de-açúcar. Apesar disso, atualmente, esses incêndios ocorrem apenas em

10% da área plantada, para a qual estão em desenvolvimento algumas medidas para extingui-los completamente (Santos *et al.*, 2021).

O uso de biocombustíveis tem sido eficaz na redução das emissões de MP, SO<sub>2</sub> e chumbo, bem como de gases de efeito estufa (dióxido de carbono e metano) (Nogueira *et al.*, 2014, 2017; Santos *et al.*, 2021). Contudo, ao contrário dos benefícios promissores das emissões regulamentadas de poluentes e CO<sub>2</sub> e da promessa de combustível verde, o uso de etanol em veículos tem sido associado ao aumento das emissões de COV e das concentrações ambientais, especialmente aldeídos (RCHO) e hidrocarbonetos não metano, o que poderá ser um dos fatores associados à formação de ozônio em altas concentrações nas grandes cidades em condições meteorológicas propícias (Suarez- Bertoa *et al.*, 2015; Abrantes *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2021).

Anjos *et al.* (2018) realizaram um importante estudo de modelagem de dispersão atmosférica, usando os modelos CAL3QHC e I-Tree Canopy na avaliação da qualidade do ar em Aracaju, no intuito de estimar as concentrações de PM<sub>10</sub> em vias de tráfego intenso de automóveis. Os resultados indicaram que, nas manhãs do verão 2015, foram verificados valores de 72 µg/m<sup>3</sup> até 120 µg/m<sup>3</sup> de MP<sub>10</sub> nas principais vias movimentadas de Aracaju. No período da noite, foi possível verificar as concentrações de MP<sub>10</sub> e a continuação de vários pontos críticos de poluição do período anterior. Baseado nas simulações, o estudo realizou modelagem para diferentes cenários hipotéticos de redução dos níveis de concentração de PM<sub>10</sub> (máximo de 120 µg/m<sup>3</sup>) verificados na área do Mercado Municipal. O objetivo era alcançar a condição de boa qualidade do ar (até 50 µg/m<sup>3</sup>, conforme Resolução Conama 491/2018) por meio da redução do tráfego de automóveis. Os resultados obtidos com as novas simulações mostraram que, no cenário de redução de 30% do tráfego, houve uma diminuição de 127 µg/m<sup>3</sup> para 85 µg/m<sup>3</sup>. Apenas com uma redução drástica de 60% no número de veículos circulante é que as concentrações de MP<sub>10</sub> diminuíram para 56 µg/m<sup>3</sup>, atingindo os limiares indicados pela Resolução CONAMA.

Segundo Anjos *et al.* (2018), as maiores concentrações de MP<sub>10</sub> foram registradas pela simulação da manhã quando a velocidade do vento foi de 2 m/s, comparando com as concentrações no período da noite com ventos de 3,7 m/s. Segundo os autores, existem interações entre emissão veicular e questões atmosféricas:

Pela manhã prevalece a estabilidade atmosférica com pouca turbulência e pouco eficaz na remoção dos poluentes. Por outro lado, o aumento na velocidade do vento dentro do modelo significa uma maior dispersão vertical e turbulência convectiva e, portanto, uma menor permanência da parcela do ar dentro da zona de mistura. o fluxo ao longo das vias com a orientação oeste-leste potencializa a ação do vento no

transporte de poluentes melhorando a qualidade do ar, visto que a direção 90° (leste) é prevalente na cidade. Na simulação da manhã, quando a velocidade do vento foi menor, as maiores concentrações de MP10 inclinaram para as vias com orientações norte-sul, podendo agravar as concentrações de poluentes, uma vez que são contrárias ao fluxo de ar dominante. Esses resultados revelam que, não só a intensidade do tráfego de automóveis influencia o grau de poluição do ar nas vias da cidade, como também as condições de ventilação urbana em harmonia com disposição dos edifícios (Anjos *et al.*, 2018).

Ainda dentro do estudo elaborado por Anjos *et al.* (2018), usando como base os dados da estação e qualidade do ar de Aracaju, por meio dos dados monitorados e publicados pela Adema<sup>7</sup>, sugere-se que o *status* da qualidade do ar é “aceitável”, uma vez que as concentrações dos poluentes (principalmente do MP<sub>10</sub>) não superam os limites estabelecidos pela CONAMA 419/2018. Essa avaliação está limitada a um raio de influência de 100 m entorno da estação de monitoramento que está a 6 km da área modelada e, portanto, distantes das fontes potenciais de emissão ou dos *hotspots* que apresentaram valores bem superiores da Resolução Federal. Por fim, nesse estudo, considera-se um *hotspot* urbano o lugar em que as concentrações estimadas de MP<sub>10</sub> violam a condição de boa qualidade do ar, superiores a 50 µg/m<sup>3</sup>.

De acordo com o Inventário de Emissões para Minas Gerais realizado por Santos (2021), para a frota veicular mineira em 2015, as emissões de NOx, seguido pelo CO, são as que mais se destacam, cujas taxas totais de emissão foram de 117.708 e 103.295 t/ano. para aquele ano. Para as emissões de NOx, os veículos a diesel foram os maiores emissores, com os caminhões e ônibus respondendo cerca de 67% e 23% das emissões, respectivamente. Os automóveis e as motocicletas foram as principais fontes de emissão de CO, o que ocorre devido à combustão incompleta de diferentes combustíveis, com índices de 47% e 27,8%, respectivamente. A emissão mais representativa para essas categorias de veículos leves ocorreu principalmente devido à frota em maior número, que juntas representaram cerca de 86,77% do total de veículos em Minas Gerais, associadas aos maiores fatores de emissão de CO aplicados às suas categorias, especialmente para veículos mais antigos. Quanto à contribuição dos diferentes tipos de combustíveis, o maior percentual de emissão de CO, com cerca de 66%, veio do gasóleo.

As emissões de PM<sub>2,5</sub> nos escapamentos de caminhões, ônibus e veículos comerciais leves no ano de 2015 em Minas Gerais foram de 2.301 e 180 t/ano, segundo o Inventário de Emissões para Minas Gerais realizado por Santos *et al.* (2021), cerca de 98% desse valor é proveniente das fontes de combustível a diesel. Esses resultados estão de acordo com o observado para seis capitais brasileiras (Belo Horizonte, Curitiba, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro e São Paulo) por Miranda *et al.* (2012) com base na composição de PM<sub>2,5</sub>. Segundo

---

<sup>7</sup> Adema: Administração Estadual do Meio Ambiente de Sergipe

estes autores, tal como em outras regiões do mundo, nas áreas urbanas, os veículos pesados a gasóleo são a principal fonte de partículas finas, o que foi justificado pela composição  $PM_{2,5}$  em termos de carbono negro.

Resultados semelhantes também foram obtidos por Brito *et al.* (2013). A partir do monitoramento da concentração de  $PM_{2,5}$  nos túneis do MASP, constataram que nos ambientes com predominância de veículos pesados, a concentração observada era 233 vezes maior que nos ambientes com circulação de veículos leves.

Ainda em consideração ao Inventário de Emissões para Minas Gerais realizados por Santos *et al.* (2021), comparando os resultados das emissões de material particulado pelo escapamento dos veículos e pelos processos de desgaste dos pneus, dos freios e da superfície da estrada, observou-se que para o  $PM_{2,5}$  o escapamento do veículo foi seu principal agente emissor, cuja contribuição foi de 63,9% (3.382 t/ano), isso porque os processos de desgaste de pneus, freios e superfícies de estradas são importantes fontes de  $PM_{10}$  nas emissões dos veículos (Santos *et al.*, 2021).

Pinto *et al.* (2020) realizaram um estudo dos perfis de comportamento de tráfego a partir de banco de dados de redes de radares fixos localizados nas principais vias de Belo Horizonte. Os resultados obtidos mostraram que o CO é o principal poluente de fontes móveis seguido por  $NO_x$ ,  $PM_{2,5}$  e  $SO_2$ .

Em Belo Horizonte, existem muitas fontes potenciais de emissão de poluentes atmosféricos, como a siderurgia, diversas caldeiras industriais, por exemplo, em hospitais, hotéis, lavanderias etc., porém as emissões veiculares, ao longo dos últimos anos, têm a emissão veicular como grande agente emissor. Os poluentes relacionados ao alto crescimento da frota veicular, que passou de pouco mais de 600 mil para 2.2 milhões de veículos entre 2000 e 2019 segundo dados do DENATRAN (2019), têm trazido desafios importantes para a gestão pública municipal.

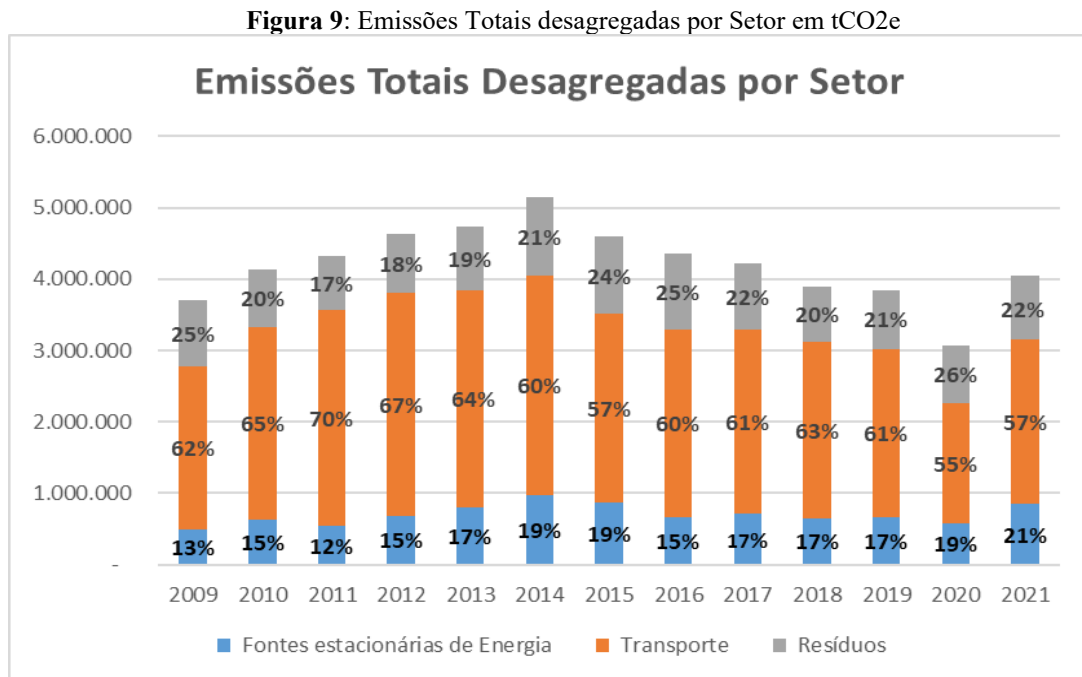
De acordo com 6º Inventário Municipal de Emissões de GEE de Belo Horizonte, as emissões aumentaram, entre 2009 e 2014, descendente dos períodos compreendidos entre 2014 e 2019, queda significativa em 2020 e retomada do aumento em 2021 com acréscimo ao nível próximo às emissões de 2017. Segundo o inventário foram dois pontos de inflexão, a saber:

- i) o primeiro deu-se em 2014 que apresentou o valor absoluto mais elevado de emissões de GEE totalizando 5.145.869 tCO<sub>2</sub>e, cuja principal fonte de emissões foi o Setor Transportes responsável por 60% das emissões, seguido pelo Setor Resíduos com 21% e finalmente pelo Setor Fontes Estacionárias de Energia com 19% das emissões de GEE”; “ii) o segundo em 2020 que apresentou os níveis mais baixos de emissão de GEE totalizando 3.063.970 tCO<sub>2</sub>e , com a participação de 55% do setor

transporte, 26% do setor resíduos e 19% do setor fontes estacionárias, tendo em vista a crise sanitária pelo Covid 19 em que apresentou restrições significativas de mobilidade e de desenvolvimento de atividades econômicas.

A cidade de Belo Horizonte apresentou, ao longo do período compreendido nesse inventário, três cenários econômicos. O primeiro compreendido de 2009 a 2014 consiste em um cenário de expansão econômica, com conseqüente elevação da renda *per capita*, o segundo compreendido de 2015 a 2018 com retração econômica, uma ligeira retomada da economia em 2019 e o terceiro, o ano de 2020, que merece destaque como uma excepcionalidade de retração, dado os efeitos advindos da grave crise sanitária da Covid-19 que adentrou também em parte do ano de 2021 (6º Inventário Municipal de Emissões de GEE, PBH).

De acordo com o 6º Inventário Municipal de Emissões de GEE, PBH, no ano de 2021, houve um acréscimo de emissões de GEE de 32%, comparado ao ano de 2020, com cerca de 4.052.790 tCO<sub>2</sub>e, nível maior que o do ano de 2019, antecessor ao da pandemia que registrou 3.847.405 tCO<sub>2</sub>e. Em 2021, o setor de transportes foi responsável por 57% das emissões de GEE, seguido pelo setor resíduos com 22% e, finalmente, pelo setor de energia com 21% das emissões de GEE (6º Inventário Municipal de Emissões de GEE, PBH).



**Fonte:** 6º Inventário Municipal de Emissões de GEE -Relatório técnico de atualização e extração dos dados período: 2009-2021. PBH.

De acordo com Radicchi (2012), em seu estudo dedicado às repercussões da poluição na saúde dos belorizontinos, chama-se atenção o fato de que as internações por doenças

respiratórias foram a segunda causa de internação em Belo Horizonte durante o ano de 2002, superando, até mesmo, as doenças cardiovasculares. Dados são ainda mais alarmantes quando se observa o grupo de crianças com até 14 anos, cujas causas respiratórias representaram o principal motivo de internação, respondendo por mais de 50% das internações entre crianças de 1 a 4 anos de idade.

Fatores familiares e sociodemográficos também contribuem para o incremento da incidência das doenças respiratórias. Dados de internação hospitalar de residentes na cidade de Belo Horizonte, em 2002, mostram que 18% das crianças de 0 a 5 anos internadas com diagnóstico de pneumonia e/ou bronquite eram moradoras do Barreiro, sabidamente uma região com altos índices de poluição atmosférica (Radicchi, 2012).

De acordo com o Projeto Manuelzão, em um dos grupos de estudo, denominado Ar & Saúde, composto em sua maioria professores das mais diversas áreas de atuação da Universidade Federal de Minas Gerais, realizou-se um estudo em 2007 comparando os efeitos da poluição do ar em crianças de 6 a 8 anos residentes nos municípios de Betim e Belo Horizonte. Os resultados apontaram maior prevalência de asma e de rinite alérgica nas crianças moradoras de Betim do que nas de Belo Horizonte. As causas segundo o estudo estão relacionadas ao fato de que os índices de contaminação do ar em Betim são os mais elevados da região metropolitana para aquele período estudado (Radicchi *et al.*, 2007).

Grande parte das pesquisas atuais e dos avanços tecnológicos para mitigação têm se centrado principalmente nas emissões de gases de escape (emissões veiculares), bem como nas ações para o seu controle. Esse aspecto, associado à legislação mais restritiva e aos avanços tecnológicos no controle da poluição veicular, tem contribuído para o declínio da concentração ambiental de partículas devido às emissões de escapamento dos veículos em alguns lugares no mundo. Nesse prisma, tornaram-se cada vez mais importantes, embora informações detalhadas sobre eles sejam relativamente escassas, os estudos ligados ao material particulado ou às partículas negras. (Santos *et al.*, 2021).

Por fim, é dentro dessa perspectiva de desafios mediante os riscos impostos pela poluição proveniente, em especial, das emissões veiculares, do agravamento dessas emissões nos grandes centros urbanos, particularmente em Belo Horizonte, que a presente pesquisa se debruça, no sentido de contribuir de forma ímpar para o aumento do conhecimento desse fenômeno complexo na capital mineira.

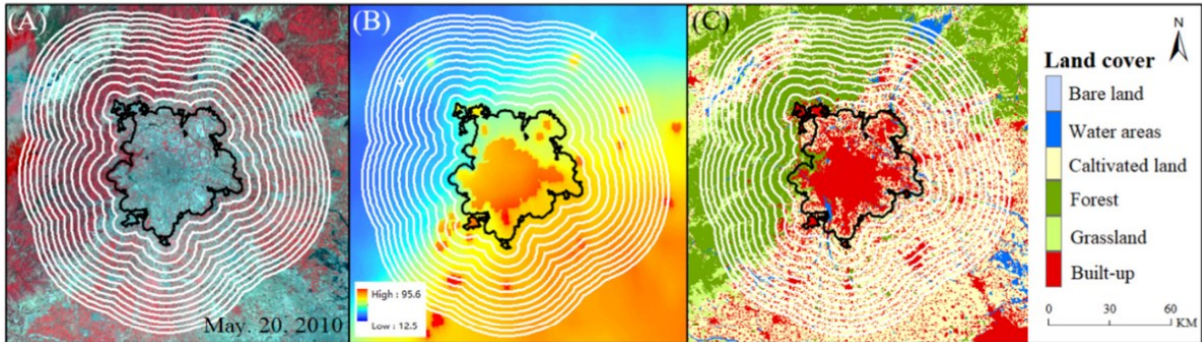
### ***2.5.2 Ilhas de poluição urbana, ilhas de neblina urbana e bacias aéreas***

Crutzen (2004) destacou a importância de estudar o aumento das concentrações de poluentes atmosféricos nas áreas urbanas, ocasionado pelo crescimento populacional urbano. Esse fenômeno foi posteriormente chamado por ele de Ilhas de Poluição conjuntamente às Ilhas de Calor. Apesar de não ter definido, no seu artigo, o conceito mais aprofundado do que ele chamou de Ilhas de Poluição, pode-se entender por definição que estava se referindo ao mesmo conceito das Ilhas de Calor nas quais se tem diferentes valores de temperatura, nesse caso poluição em porções geográficas distintas. Ao que tudo indica, pelos levantamentos bibliográficos realizados, foi de fato Crutzen (2004) a relatar pela primeira vez essa terminologia para a poluição atmosférica.

Zhu *et al.* (2020) desenvolveram um método baseado na abordagem de anel concêntrico e função sigmoide modificada para identificar ilhas de neblina urbana e extrair três características: o valor de fundo das ilhas de neblina urbana (BUHI), a intensidade das ilhas de neblina urbana (IUHI) e a extensão da neblina urbana, ilhas de neblina (EUHI). Usando esse método pioneiro, os dados de concentração de PM<sub>2,5</sub> para 346 cidades chinesas em 2016, as características espaciais e os fatores determinantes das três características das ilhas de neblina urbana indicaram que cerca de dois terços (218/346) das cidades chinesas tiveram um fenômeno significativo de ilha de neblina urbana.

Li *et al.* (2019) analisaram o fenômeno das Ilhas de Poluição Urbana (IPU) na China em termos de concentração de MP. A análise foi realizada por meio de métricas e das IPU, nas quais quantificaram a distância em que uma IPU pode se estender da área urbana à periferia. Para quantificar as chamadas IPU, os autores geraram áreas de anéis concêntricos (buffers) que se expandem radialmente desde a área urbana em direção à periferia. Os buffers foram gerados a partir da metade do tamanho da área urbana e definidos como a unidade de medida em que a IPU se expande. Ou seja, a IPU, segundo os autores, pode se expandir entre 1 e 12 vezes a metade do tamanho da área urbana. Ao longo dos estudos, a IPU foi identificada em 283 cidades, das quais 120 apresentaram uma IPU > 5 µg/m<sup>3</sup> e 160 cidades exibiram uma IPU que se estendeu entre 4,5 e 7 vezes o tamanho da área urbana. O estudo identificou que mais de 200 cidades apresentaram um decaimento nas concentrações do MP<sub>2,5</sub>, ocorrendo de forma radial em direção à periferia, como ilustrado na (FIG 1.10) a seguir.

**Figura 10:** Delimitação da área urbana e das 12 zonas tampão, usando Pequim como exemplo. (A) Imagem em cores falsas do *Landsat Thematic Mapper* em 20 de maio de 2010. (B) Média anual PM<sub>2,5</sub> concentrações em 2010. (C) Mapa de cobertura do solo do CLUD para 2010 com resolução espacial de 30 m.



**Fonte:** *Evidence of the mitigated urban particulate matter island (UPI) effect in China during 2000–2015* (Li *et al.*, 2019).

Cao *et al.* (2020) quantificaram a IPU e as métricas de 27 cidades da Baía de Hangzhou (China) nos anos 2000, 2005, 2010 e 2015, usando concentrações médias do MP<sub>2,5</sub> das áreas urbanas e periféricas. Os autores observaram que mais da metade das cidades apresentaram o fenômeno da IPU com valores médios de 3,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para o ano 2000 e maiores de 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nos anos 2005, 2010 e 2015. Os autores calcularam a intensidade da IPU com um valor adimensional obtido pela razão entre a diferença das concentrações urbanas e rurais e as concentrações urbanas, definindo o valor de 0,1 como intensidade da IPU alta. A intensidade IPU variou para as 27 cidades, algumas com intensidades > 0,2 e outras com intensidades entre 0,1 e 0,2.

**Quadro 3:** Principais estudos de Ilhas de Poluição Urbana e Ilhas de Neblina Urbana

<b>Autores</b>	<b>Região de estudo</b>	<b>Pais de origem</b>	<b>Título da obra</b>
Li <i>et al.</i> (2018)	Berlim	Alemanha	Interação entre ilha de calor urbano e ilha de poluição urbana durante o verão em Berlim.
Huang <i>et al.</i> (2019), citado por Camacho (2022)	338 cidades	China	Variações espaço-temporais do PM <sub>2,5</sub> e a relação com fatores meteorológicos durante o período de 2013-2014 em Pequim, China.
Cao <i>et al.</i> (2020)	Hangzhou	China	Expansão e caracterização urbana. Topografia urbana. Características econômicas e concentração de MP <sub>2,5</sub> .
Li <i>et al.</i> (2020a)	Berlim	Alemanha	Variação temporal da ilha de poluição urbana por aerossóis e sua relação com a ilha de calor urbana.
Li <i>et al.</i> (2020b)	Pequim	China	Relações observadas entre a ilha de calor urbano, a ilha de poluição urbana e a radiação descendente de ondas longas na área de Pequim.
Zhu <i>et al.</i> (2020)	338 cidades	China	Identificando ilhas de neblina urbana e extraíndo suas características espaciais.
Camacho (2022)	São Paulo	Brasil	Características da ilha de poluição do ar urbana na região metropolitana de São Paulo: uma abordagem combinando dados de satélite e de superfície.

**Fonte:** Adaptado de Camacho (2022).

Apesar do grande número de estudos publicados nos últimos anos sobre qualidade do ar em cidades do mundo inteiro usando dados observacionais, modelagem e sensoriamento remoto, os estudos com foco em IPU surgiram apenas na última década, especialmente a partir de 2020, sendo os pesquisadores chineses que mais incorporaram essa terminologia. No Brasil, os registros bibliográficos indicam que Camacho (2022) foi praticamente o primeiro a usar a terminologia adotada pelos pesquisadores chineses ao se debruçar sobre a poluição do ar urbana na região metropolitana de São Paulo por meio de uma abordagem combinando dados de satélite e de superfície. Em conclusão do seu estudo, os resultados apontaram a inexistência do fenômeno da IPU para o MP<sub>2,5</sub>, mas a existência da IPU para o O<sub>3</sub> e AOD<sup>8</sup> na RMSP.

De acordo com Farias (2013), foi por meio do Inventário de Fontes Emissoras de Poluentes Atmosféricos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (2004), que a nomenclatura

<sup>8</sup> AOD: *Aerosol Optical Depth*.

“Bacia Aérea” foi utilizada para designar as sub-regiões pela primeira vez, embora esta não apareça nos documentos mais recentes do INEA<sup>9</sup> (2007, 2008, 2009). Para Farias (2013), esse termo define: “as áreas com distintas concentrações de poluentes, formadas em consequência da orientação das vertentes e da altitude do relevo da RMRJ, que influenciam na direção dos ventos de superfície e dificultam a dispersão de poluentes”.

Oliveira (2004), naquele mesmo ano, junto ao departamento de Eng. Civil (UFRJ), assim define uma Bacia Aérea:

Uma Bacia Aérea, embora o nome sugira um volume da atmosfera, é uma área cuja topografia, delimitada por uma cota altimétrica mínima, dificulta a dispersão de poluentes gerados pelas atividades socioeconômicas. Em determinadas bacias as condições climáticas predominantes, na estação de inverno, comprometem a qualidade do ar, agravando a saúde das pessoas, principalmente, de idosos e crianças com problemas respiratórios. As Bacias Aéreas por estarem submetidas a constantes estratégias de controle da poluição do ar podem ser consideradas verdadeiras unidades de gerenciamento da qualidade do ar (Oliveira, 2004, p.70).

Contudo, ao que tudo indica, o conceito de Bacia Aérea pode ter surgido ainda no final dos anos 1997, por meio do “Estudo de Dimensionamento da Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar para Cidade do Rio de Janeiro- I Parte” e “Dimensionamento Qualitativo, Quantitativo e Definição Locacional da Rede de Monitoramento- II Parte” junto ao Departamento de Meteorologia-UFRJ e Secretaria Municipal de Meio Ambiente/Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (Pires, 2005).

Pires (2005), também do departamento de Eng. Civil (UFRJ), elabora o conceito de Bacia Aérea dentro das seguintes perspectivas:

Regiões com características climatológicas constantes, delimitadas pela topografia e pelos espaços aéreos vertical e horizontal constituem as bacias aéreas, por onde toda a poluição dos centros urbanos irá se homogeneizar causando a sua degradação como um todo, degradando ainda o ar de áreas não ocupadas (Pires, 2005, p. 14).

Segundo Farias (2013), no Rio de Janeiro, os maciços atuam como barreiras físicas aos ventos predominantes, assim o INEA divide a RMRJ em quatro sub-regiões, quando analisa a qualidade do ar (INEA, 2007, 2008, 2009), funcionando as bacias aéreas como unidades de gerenciamento da qualidade do ar.

O próprio Farias (2013) faz uma proposta metodológica para analisar as bacias aéreas por meio da influência do relevo na circulação do ar, propondo comparar a capacidade de

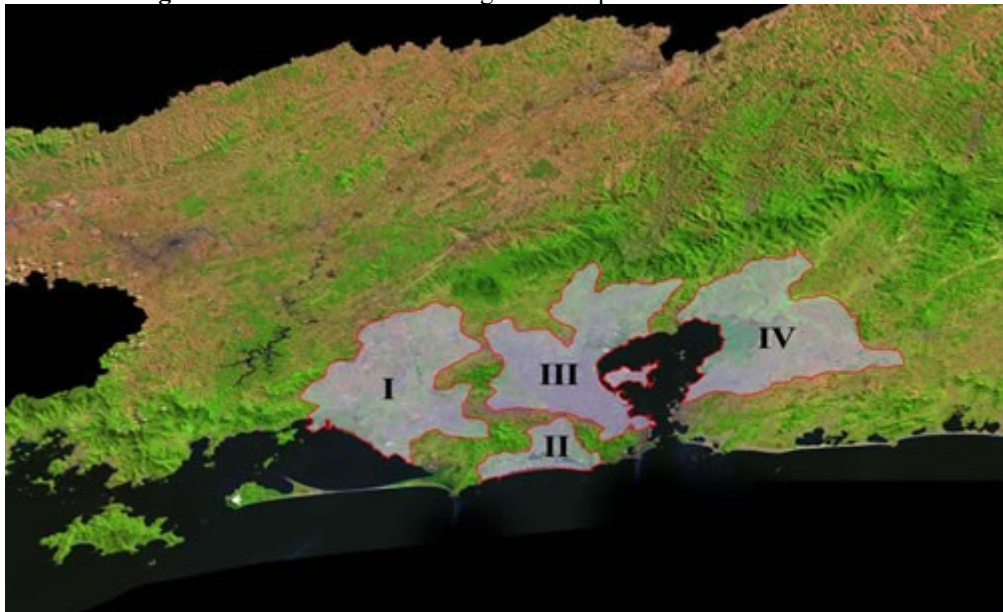
---

<sup>9</sup> INEA: Instituto Estadual do Ambiente (RJ).

dispersão de poluentes de diferentes localidades dentro da RMRJ, para comprovar ou refutar a existência de bacias aéreas, um conceito proposto para definir áreas formadas pela orientação das vertentes e da altitude do relevo, que influenciam na direção dos ventos de superfície e no transporte de poluentes. Para alcançar os objetivos propostos, utilizou-se da modelagem numérica atmosférica: o modelo *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) e o Trajetórias Cinemáticas 3D.

Segundo Pires (2005), em função das influências topográficas e meteorológicas da região, indicava-se a necessidade de se subdividi-la em quatro sub-regiões, com características mais homogênea sob o ponto de vista da gestão da qualidade do ar. Nesse sentido, a Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) dividiu a Região Metropolitana em quatro sub-regiões, denominando-as de “Bacias Aéreas”, em um estudo de dimensionamento da rede de monitoramento qualidade do ar, de acordo com a imagem de satélite (FIG. 1.11) a seguir.

**Figura 11:** Bacias Aéreas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro



**Fonte:** Cavalcant (2003).

Com base nos dados de Inventários de emissões realizados pela resultados de FEEMA (2004), Pires (2005) apresentou os seguintes resultados. Na Bacia Aérea I, estão instaladas empresas de geração de energia, uma das principais contribuintes para as emissões totais (34%), com elevado potencial poluidor, tais como as metalúrgicas, com produção de alumínio, e as pequenas empresas de produção de asfalto, que utilizam óleo combustível em seus processos de geração de energia térmica. Contudo, a maior contribuição nas emissões totais (58%) refere-

se à Bacia Aérea III em que está concentrada a maioria das atividades industriais da região, quase 58% das empresas, sendo a área na qual estão instaladas as refinarias e muitas outras atividades com elevado potencial poluidor. A Bacia Aérea IV apresenta uma grande concentração de atividades cerâmicas que fabricam tijolo, telhas etc. e utilizam, além do óleo combustível, madeira para a geração de calor no processo de cozimento das peças. Por fim, a Bacia Aérea II foi a que apresentou o menor número de empresas inventariadas e, portanto, menor potencial poluidor.

Como repercussão do conceito de Bacias Aéreas, Radicchi<sup>10</sup> (2012), ao tratar da poluição na região metropolitana de Belo Horizonte e seus efeitos na saúde da população, assim descreveu:

Assim como a água que se distribui no território em forma de bacia (a bacia hidrográfica), também o ar apresenta uma dispersão por uma área geográfica conhecida como bacia aérea. Na região metropolitana de Belo Horizonte, a bacia aérea é conformada pelo cinturão das serras do Curral Del Rei e da Moeda, ao sul, e o complexo do Espinhaço, ao norte. Nesse corredor, onde o vento circula predominantemente no sentido leste-oeste, os poluentes atmosféricos se concentram na região do Barreiro, em Belo Horizonte, na área industrial de Contagem e no centro de Betim (Radicchi, 2012, p.196).

Assim como as Ilhas de Poluição Urbana, os estudos utilizando a terminologia de Bacias Aéreas também não são tão amplos e praticamente são restritos aos autores brasileiros, em especial, do Rio de Janeiro. Ao que tudo indica, a terminologia foi utilizada para fins de gestão pública da qualidade do ar que já era uma preocupação ao final dos anos 90. Trata-se, portanto, de unidades de planejamento territorial, nas quais se leva em consideração sua carga de emissão atmosférica em função das atividades industriais e humanas existentes. Para fins de controle e de avaliação da qualidade do ar por região, foram instaladas estações de monitoramento de forma a representar as 4 unidades em questão (Bacias Aéreas).

---

<sup>10</sup> Radicchi, A.L.A.) Prof. da Faculdade de Medicina da UFMG. A poluição na bacia aérea da região metropolitana de Belo Horizonte e sua repercussão na saúde da população

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 Breve Histórico do Início da Capital Mineira - Belo Horizonte

Em meio aos ideários republicanos, logo após a Proclamação da República, as oligarquias mineiras se juntaram para promover uma mudança da capital mineira para outra localidade, que permaneceu até 1887 em Ouro Preto. A decisão de mudar a capital foi tomada devido ao crescimento populacional e à necessidade de uma localização mais central e com melhores condições sanitárias e infraestruturas, uma vez que Ouro Preto já não comportava mais como um modelo de metrópole pretendida pelas elites vigentes.

Fomentado por esse ideário, o então nomeado governo provisório da República em 1891, governador Augusto de Lima, determinou a organização de uma comissão técnica para estudar as condições gerais de cinco localidades com o objetivo de instalar a futura capital das Minas Gerais (Barreto, 1995). O responsável por esse estudo técnico de viabilidade ficou a cargo do Engenheiro Aarão Reis, que recrutou mais alguns especialistas entre engenheiros e um sanitarista. Os trabalhos tiveram início já naquele ano de 1891, sendo que, em dois anos depois (1893), a construção da nova capital foi oficialmente iniciada. Belo Horizonte foi, desse modo, construída como uma das primeiras cidades planejadas do Brasil, com um *layout* moderno, com um bom planejamento urbanístico, que incluía largas avenidas, importantes áreas verdes e um sistema de esgotamento bem moderno para a época.

O local escolhido para a construção foi a antiga fazenda do Curral Del-Rei, situada em uma região montanhosa na sua porção leste-sul interligada por uma importante depressão que se alongava até sua porção norte. Aarão Reis, assim, avalia as condições de implantação da nova capital na localidade de Curral Del-Rei, descrevendo as principais características físicas da área (Barreto, 1995):

(...)mais de 800m acima do nível do mar, acresce ainda a circunstância de, assente sobre a bacia do ribeirão do Arrudas, apresentar a localidade em seus principais lineamentos topográficos, a bela forma de um vasto e amplo anfiteatro, aberto para o Oriente, como para receber desde cedo os benéficos raios solares, e, encostando-se, ao sul, à serra do Curral, que a protege contra os ventos frios e úmidos que, nessa direção, atravessam as serras de Ouro Branco e da Moeda, e, ao norte, a serra da Contagem, que atenua os efeitos dos ventos cálidos que, atravessando as margens pouco salubres do S. Francisco, sopram nessa direção, ficando, porém, inteiramente desafogada para os ventos - antes brisas - do leste, que a bafejam constantemente, e, também, para os do oeste, que sopram algumas vezes do vale do Paraopeba, mais elevado que o rio das Velhas e coberto de extensas matas fartamente regadas por abundantes córregos e ribeirões (Reis, 1893, *apud* Barreto, 1995, v. I, p.350).

Conforme Barreto (1995), além das condições urbanísticas favoráveis à instalação da nova capital, Aarão Reis e sua equipe também se ativeram às condições ambientais, climáticas e sanitárias, o que era um grande feito para a época. O relatório técnico, assim, classificou a região como dotada de um clima ameno e boas condições de salubridade. Para a equipe, a amenidade do clima da região podia ser atribuída aos invernos bem-marcados, relativamente brandos, e verões mais amenos e úmidos. Dessa forma, o fator altitude contribuía para diminuir a sensação de desconforto gerada por altas temperaturas nos meses mais quentes do ano (dezembro, janeiro e fevereiro).

Belo Horizonte, planejada para ser a nova capital de Minas Gerais, foi inaugurada em 12 de dezembro 1897 com um plano urbanístico bem definido, baseado em um traçado reticulado e amplas avenidas. Inicialmente planejada para uma população de cerca de 200 mil habitantes, Belo Horizonte rapidamente ultrapassou essa previsão, resultando em um desenvolvimento urbano desordenado nas décadas seguintes (Barreto, 1995). A cidade atraiu muitos migrantes de áreas rurais em busca de melhores oportunidades de trabalho e condições de vida. Essa migração em massa não foi acompanhada por um planejamento urbano adequado nas fronteiras pós-Av. Contorno, resultando na formação de bairros periféricos sem infraestrutura básica.

Figura 12: Planta Geral de Belo Horizonte em 1895



Fonte: Histórias de Bairros de Belo Horizonte: Regional Oeste.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> RIBEIRO R. R. (Organizador). **Histórias de Bairros de Belo Horizonte: Regional Oeste**. Arquivo Público da Cidade, 2011. Produzido pelo Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte. ISBN: 978-85-64559-01-1.

**Figura 13:** Praça Raul Soares em 1936.



**Fonte:** Arquivo Nacional.

Com a urbanização crescente, especialmente na década de 1930 e 1940, houve um aumento significativo na demanda por habitação em toda a cidade, surgindo, então, as primeiras áreas periféricas ao cinturão da Avenida Contorno. Na maioria dos casos, essas novas áreas residenciais foram estabelecidas de forma improvisada, sem a implementação de serviços públicos essenciais. A ausência de políticas habitacionais eficazes contribuiu para o surgimento de favelas e de assentamentos irregulares. O plano original de Belo Horizonte, embora inovador para a época, não previa um crescimento populacional tão rápido e intenso. As limitações desse plano se tornaram evidentes à medida que a cidade se expandia além das áreas planejadas. A população de baixa renda, sem acesso a moradias planejadas e acessíveis, ocupou terrenos de forma desordenada, formando um adensamento urbano. A expansão urbana começou a ocorrer além dos limites planejados, especialmente em direção ao norte, leste e oeste. Bairros como Lagoinha e Santa Efigênia começaram a se desenvolver, muitas vezes, de forma desordenada e sem a infraestrutura adequada. A migração intensa e a falta de políticas habitacionais resultaram no surgimento de bairros ainda mais populares e favelas, surgindo, desse modo, a Favela da Pedreira Prado Lopes, uma das primeiras favelas de Belo Horizonte.

Assim, a formação de bairros densamente povoados, sem planejamento adequado, resultou em problemas de mobilidade urbana, com ruas estreitas e falta de transporte público eficiente, que são até hoje sentidos seus reflexos. Nos anos seguintes, diversas administrações municipais tentaram mitigar os efeitos do crescimento desordenado por meio de planos

diretores, de políticas de urbanização e de projetos de habitação popular. Contudo, os desafios do crescimento desordenado, nas décadas de 1920 e 1930, deixaram um legado duradouro na estrutura urbana e social de Belo Horizonte.

O processo de industrialização de Belo Horizonte, nas décadas de 1950 e 1960, foi um período crucial para o desenvolvimento econômico e urbano da cidade. Durante esse tempo, a cidade se consolidou como um importante centro industrial do Brasil, influenciando significativamente sua estrutura socioeconômica e territorial. Juscelino Kubitschek, ex-governador de Minas Gerais, assumiu a presidência do Brasil em 1956 com um plano de desenvolvimento que buscava "cinquenta anos em cinco". Ele incentivou a criação da infraestrutura e a industrialização, impactando diretamente Belo Horizonte (FIG.14). Os incentivos fiscais e a construção de infraestrutura, como estradas e ferrovias, facilitaram a instalação de indústrias em Belo Horizonte (FIG.15). Os governos estadual e federal promoveram a industrialização como parte de suas estratégias de desenvolvimento nacional e regional e Belo Horizonte, devido à sua localização geográfica central e ao seu sistema de transporte existente, tornou-se um ponto estratégico para a distribuição de produtos industrializados, esta ação atraiu empresas em busca de eficiência logística na época (Neves, 2014<sup>12</sup>; Histórias de Bairros de Belo Horizonte: Regional Oeste, 2011).

A partir das décadas de 1940 e 1950, o crescimento de Belo Horizonte teve um impulso cada vez maior, devido à expansão das indústrias. A área central da cidade continuava concentrando os principais serviços, como comércio e bancos. Como ela já estava quase toda ocupada e não havia mais terrenos livres para a construção, teve início a expansão "para cima". Surgiam os primeiros arranha-céus. Ônibus e automóveis tornaram-se os meios de transporte mais comuns. Eles trafegavam também em direção aos novos bairros, pelas avenidas Antônio Carlos, Pedro II e Amazonas, construídas nesse período. A construção da lagoa e dos edifícios modernistas da Pampulha é um marco daquelas décadas (Histórias de Bairros de Belo Horizonte: Regional Oeste, 2011).

Na década de 1940, foi dado o passo decisivo para a industrialização da região e seu entorno, quando o então prefeito de Belo Horizonte, Juscelino Kubitschek, e o presidente Getúlio Vargas apostaram na criação de empresas que trouxessem investimentos e empregos para a região por meio do primeiro distrito industrial planejado do país, em Contagem, com a instalação de linhas férreas desviadas para atender às novas empresas que ali se instalavam,

---

<sup>12</sup> **Escritório de Histórias.** Codemig – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais – 10 anos. Belo Horizonte: 2014. Acessado em 05 de maio de 2024. Disponível em: <http://www.codemge.com.br/atividades-em-destaque/distritos-industriais/historico/>.

mais uma marco para continuidade do desenvolvimento da capital . Na década seguinte, a vocação para o desenvolvimento se aprofundaria, com passos decisivos em 1952, quando foi criada a Cemig, primeira estatal de energia que abriria as portas definitivas para atrair outros empreendimentos, especialmente os industriais. Em 1954, Getúlio Vargas e Juscelino Kubitschek participariam ainda da inauguração da Companhia Siderúrgica Mannesmann, no Barreiro, consolidando definitivamente a capital como um dos polos industriais do país. Nos anos 1960, com o apoio institucional do governo mineiro, por meio da criação do Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais (BDMG), passaria a ser decisivo para trazer outras grandes empresas para capital, mas também para demais regiões do Estado de Minas Gerais (Neves, 2014; EM, 2018<sup>13</sup>).

---

<sup>13</sup>A trajetória da industrialização de Minas Gerais. Jornal Estado de Minas, 2018. Consultado em 05 de outubro de 2024. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/90-anos/2018/03/05/interna\\_90\\_anos,941901/a-trajetoria-da-industrializacao-de-minas-nas-paginas-do-em.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/90-anos/2018/03/05/interna_90_anos,941901/a-trajetoria-da-industrializacao-de-minas-nas-paginas-do-em.shtml)

**Figura 14:** Vista área de Belo Horizonte em 1956



**Fonte:** IBGE.

**Figura 15:** Zona Industrial de Belo Horizonte (1967), Avenida Amazonas



**Fonte:** IBGE.

O processo de industrialização, nas décadas de 1950 e 1960, deixou um legado duradouro em Belo Horizonte, estabelecendo a cidade como um dos principais polos industriais

do Brasil. Esse período de crescimento industrial influenciou profundamente a estrutura urbana, social e econômica da cidade, cujas repercussões são sentidas até os dias atuais.

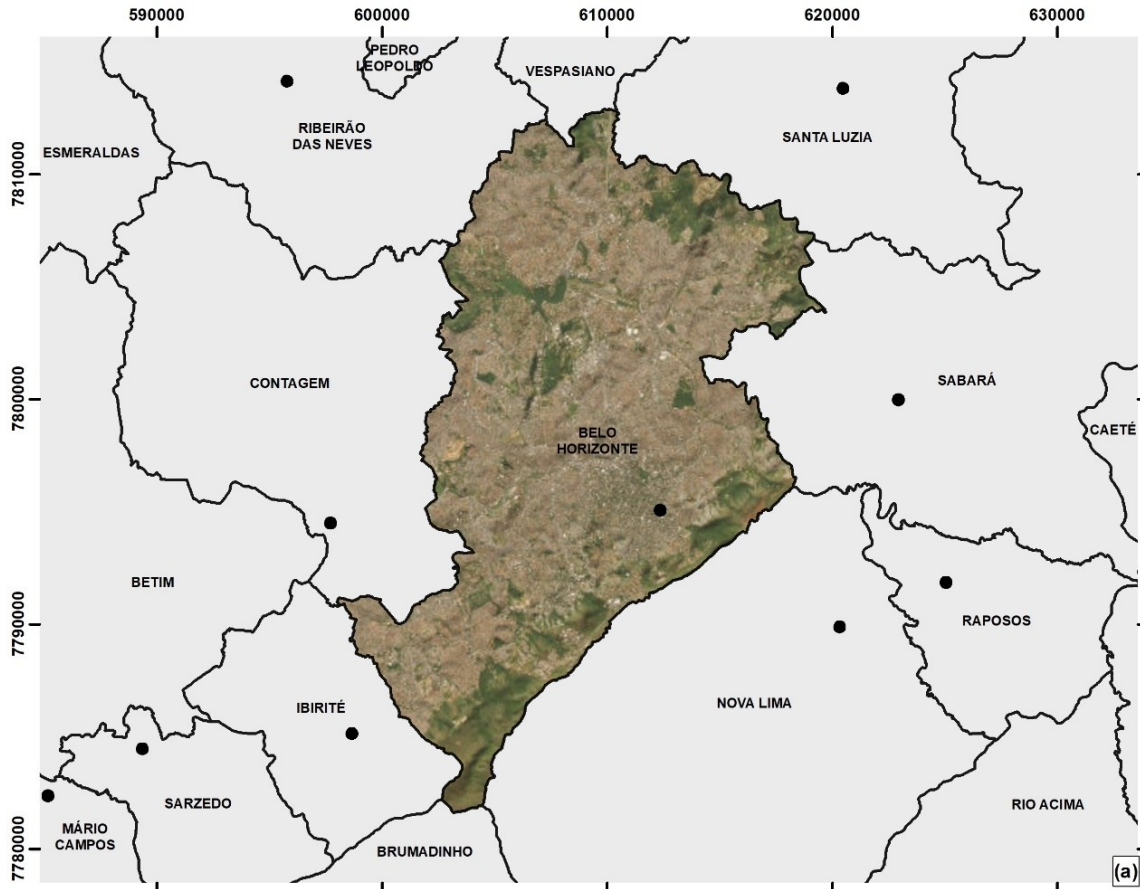
Por fim, é importante ressaltar que o modelo de expansão urbana observado ao longo das décadas, ao qual Belo Horizonte se submeteu, irá refletir substancialmente nas questões de padrões de qualidade ambiental e comportamento atmosférico, os quais serão tratados nos capítulos seguintes.

### **3.2 Caracterização Dos Aspectos Físicos De Belo Horizonte**

Belo Horizonte é a capital político-administrativa do estado de Minas Gerais, Brasil. Apresentando-se uma área total de 331 km<sup>2</sup>, o município se insere na parte central do estado a que pertence, localizando-se entre as latitudes: S 19°46'35'' a 20°03'34'' e longitudes: O 43°51'27'' a 44°03'47'' (FIG.16).

A maioria da área urbana se encontra entre colinas e vales do embasamento cristalino. Dessa maneira, a formação geológica do município é bastante variada, sendo dividida em dois grandes domínios litológicos e geomorfológicos: o Complexo Belo Horizonte e o Supergrupo Minas do Quadrilátero Ferrífero (FIG.17).

Figura 16: Mapa de localização do município de Belo Horizonte



**LEGENDA (a)**

- Sede municipal
- limite municipal

**ESCALA GRÁFICA (a)**

0 5 10 Km

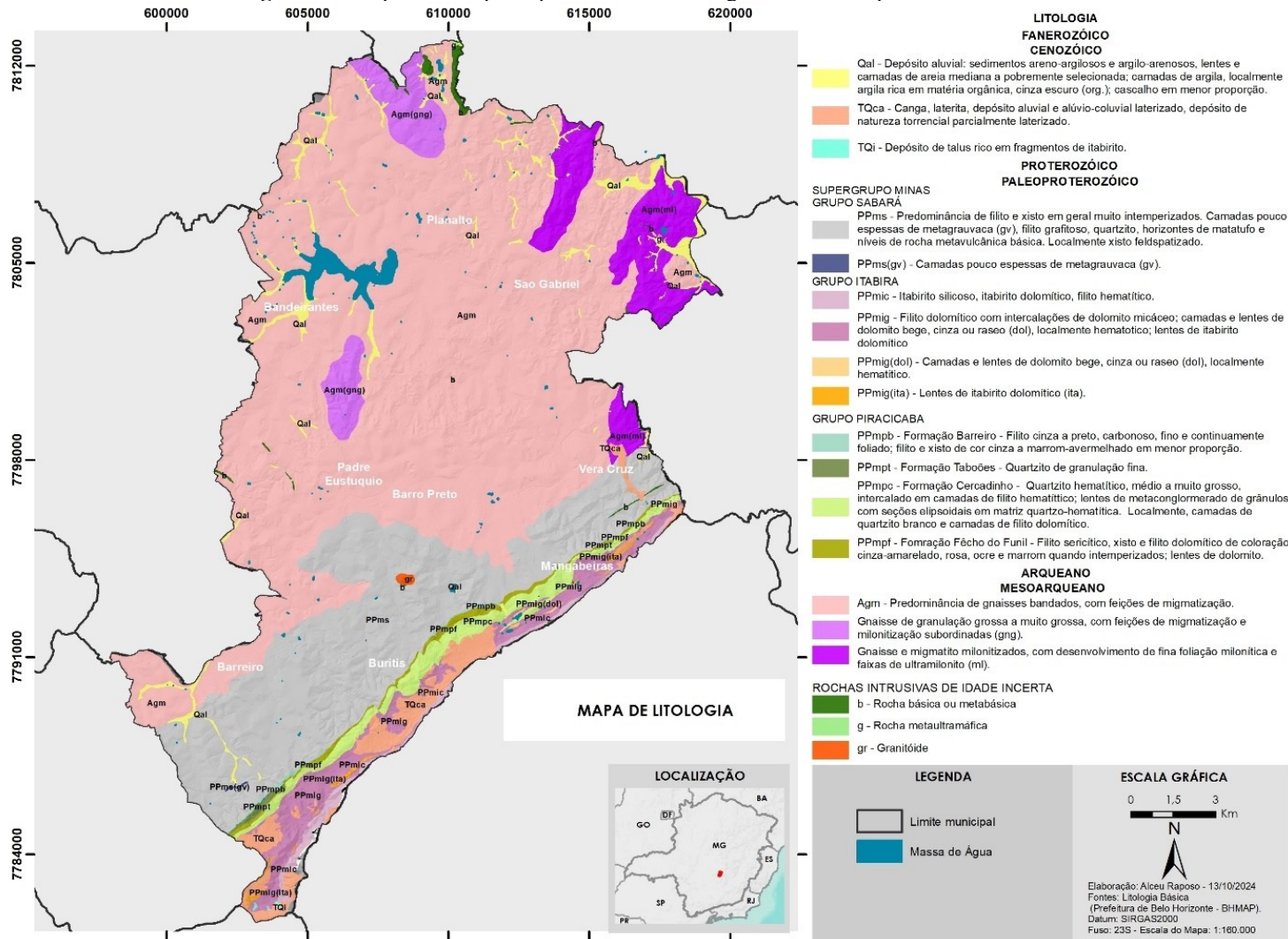
N

**MAPA DE LOCALIZAÇÃO**

Elaboração: Alceu Raposo - 11/07/2024  
Fontes: Divisas e Limites (IBGE, 2022)  
Datum: SIRGAS2000  
Fuso: 23S

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17: Mapa com os principais domínios litológicos do município de Belo Horizonte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro domínio compõe aproximadamente 70% do território da cidade, composto, basicamente, por rochas granito-gnáissicas, como granitos, gnaisses e granodioritos. Os solos que se desenvolvem a partir dessas litologias são, geralmente, silto-arenosos a argilo-areno siltosos, sendo esses bastante suscetíveis a processos erosivos, principalmente nas porções de solos pouco desenvolvidos (Junior; Parizzi, 2018). A respeito de sua geomorfologia, a área que corresponde a esse domínio é a famosa Depressão de Belo Horizonte, que se caracteriza por um relevo de mar de morros, colinas - como citado anteriormente - e espigões, apresentando altitudes entre 600 e 900 metros.

Por sua vez, o Supergrupo Minas do Quadrilátero Ferrífero está inserido mais ao sul da cidade, ocupando os restantes 30% do seu território, sendo composto por rochas metassedimentares dos grupos Cauê, Piracicaba e Sabará (Junior; Parizzi, 2018). Em resumo, as rochas que o compõem são, basicamente, itabiritos, dolomitos, quartzitos, filitos e xistos diversos. Os solos, em grande maioria, são argilosos, pouco espessos e as formações superficiais constituídas, fundamentalmente, de canga e depósitos de vertentes do tipo talus, característica oriunda das rochas bastante impermeáveis e resistentes ao intemperismo (Ramos *et. al.*, 1999). O relevo dessa parte de Belo Horizonte se apresenta acima de 900 metros, tendo alguns pontos de elevação como destaque, tais como a Serra do Curral, entorno de 1340 metros, e o extremo sul de Belo Horizonte na região do Barreiro, Serra do Rola Moça, com elevações acima de 1500 metros.

Por disporem de rochas com resistências, grau de alteração e erosão diferentes, os domínios explicam a diferenciação de altimetria da cidade e formação geomorfológica, sendo as rochas do Complexo Belo Horizonte menos resistentes, com grau de alteração e erosão maiores, enquanto as do Supergrupo Minas são o contrário dessas características. Por isso, o primeiro está inserido na chamada Depressão de Belo Horizonte, com altitudes menores, e o segundo explica a existência da Serra do Curral, com altitudes superiores.

Como visto pelas características citadas acima, outro componente físico que também tem variação é o solo. Com isso, segundo Brandalise e Heineck (1999), os solos presentes em Belo Horizonte são, basicamente, cambissolos distróficos, latossolos distróficos vermelho-amarelados e solos podzólicos (espodossolos) vermelho-amarelados distróficos ou eutróficos. Nas regiões mais elevadas, há associação de cambissolos e litossolos.

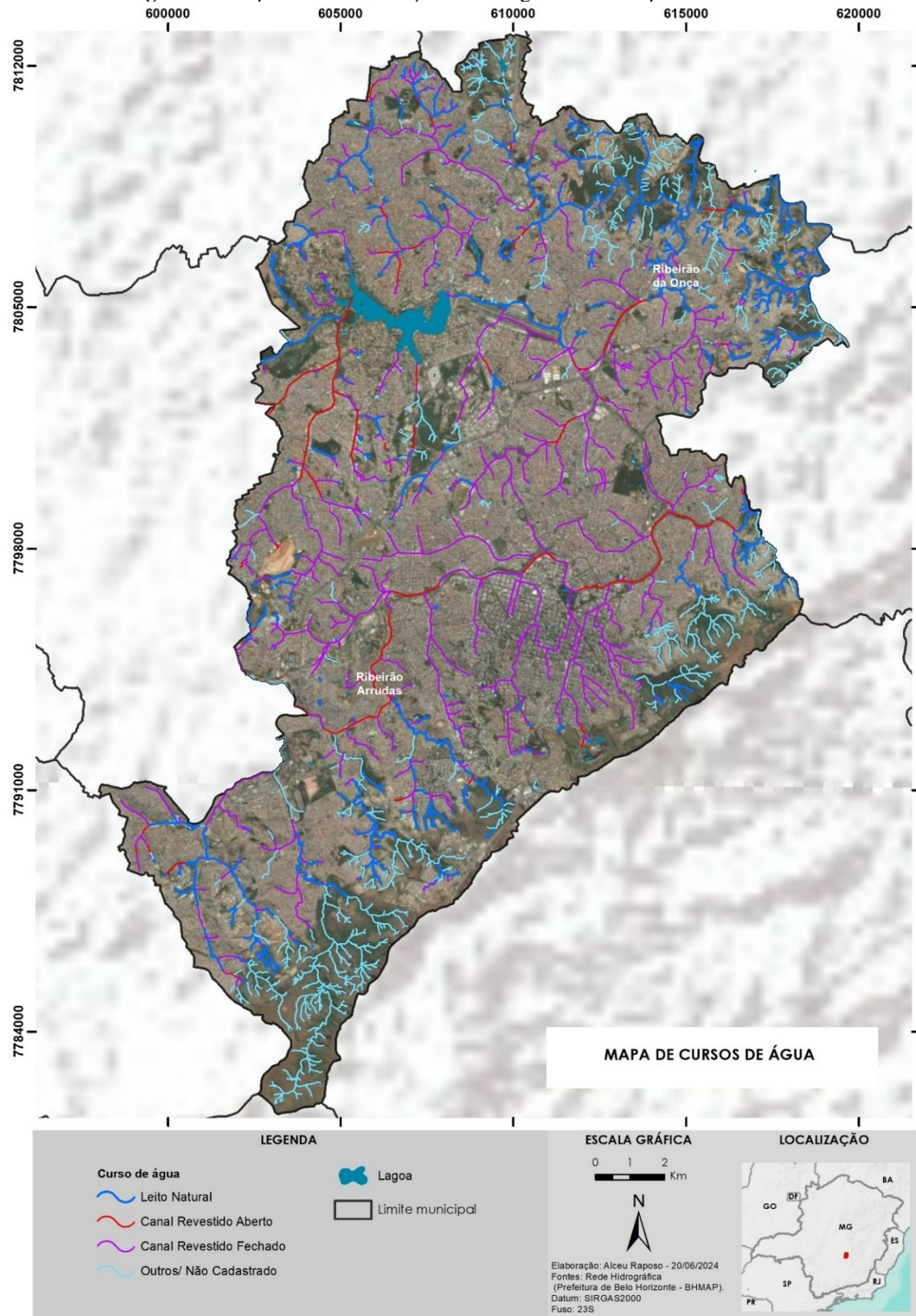
Essa variação se dá pela diversidade de rochas, em outras palavras, de material de origem. Contextualizando, para as áreas onde o material de origem é menos resistente, com grau de alteração e erosão maiores (por exemplo, dentro do Complexo Belo Horizonte), os solos presentes são latossolos e argissolos, que se caracterizam por serem solos mais desenvolvidos,

tendo camadas mais espessas e de maior profundidade (acima de 2,0 m) (Brandalise; Heineck, 1999).

Pela parte presente nas áreas dentro do Supergrupo Minas do Quadrilátero Ferrífero em que há material de origem é mais resistente e menos suscetível a alterações, os solos são, basicamente, cambissolos e litossolos, que se caracterizam por serem solos mais finos, com um menor grau de desenvolvimento e profundidade (Brandalise; Heineck, 1999).

A literatura considera, em suma, duas grandes bacias hidrográficas nos limites de Belo Horizonte: Bacia do Ribeirão do Onça e Bacia do Ribeirão Arrudas. A primeira se encontra dentro da área de mar de morros da Depressão de Belo Horizonte, com padrões de drenagem do tipo dendrítico, enquanto para as suas sub-bacias o padrão é de circular a ramificado. Por sua vez, a segunda se estende da área central até o sul do município, com padrões de drenagem que vão de dendrítico (na área central) e paralela, enquanto, para as suas sub-bacias, o padrão é alongado (considerando a parte mais ao sul), influenciados pelas elevadas altitudes e declividades (FIG.18).

**Figura 18:** Mapa com a distribuição da drenagem no município de Belo Horizonte.



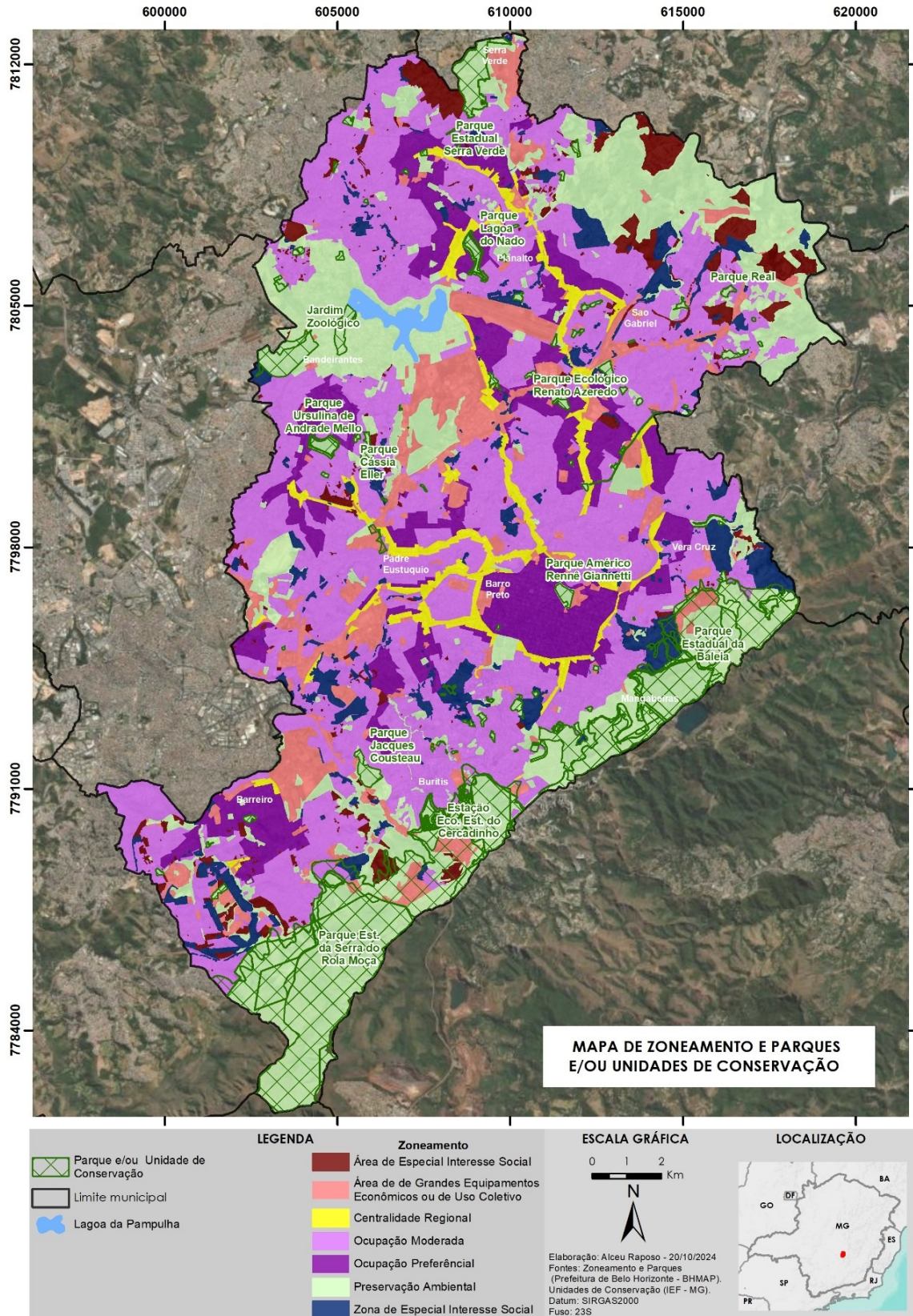
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Sobre esse contexto, as enchentes acontecem, sobretudo, na Bacia do Ribeirão do Onça, ao passo que as enxurradas repentinas e as cheias seguidas de inundações são mais frequentes na Bacia do Ribeirão Arrudas. Além disso, para Lucas *et. al.* (2015), essa diferenciação se dá, principalmente, pela variação dos níveis hipsométricos, em que Belo Horizonte varia entre 680m e 1480m. Assim, os autores alegam que as Regionais Venda Nova, Norte e Nordeste são de menores altimetrias, sendo áreas mais planas, com cotas altimétricas em média entre 780m e 900m. Agora, as regiões Leste, Centro-Sul, Oeste e Barreiro possuem diferença hipsométrica de 500 m, sendo que, na regional Barreiro, essa diferença chega a 780 m, constituindo as áreas de maiores altimetrias da cidade.

Associado a isso, segundo dados da Prefeitura de Belo Horizonte, a declividade média do município é de 8,28%, em que as partes com trechos mais suaves se encontram na Área Central e na Regional Pampulha, esta, por sua vez, dispendo da menor média entre as demais regionais (5,65%). Por sua vez, a Regional Leste tem a maior média de declividade (9,76%), seguido da Regional Centro-Sul (9,60%).

Belo Horizonte se encontra em uma área de transição entre a Mata Atlântica e o Cerrado, por isso, espera-se que a flora e a fauna sejam referentes a esses dois biomas. No entanto, a sua ocupação urbana é quase que total, e as áreas de vegetação, em sua maioria, são cobertas por mata secundária, graças à intervenção antrópica (FIG.19). Por causa disso, para Brandalise & Heineck (1999), os fragmentos de vegetação de floresta tropical subcaducifólica são vestígios da exuberante vegetação da Mata Atlântica, ao mesmo tempo que, nas áreas onde a vegetação exhibe traços de cerrado, a maioria está mais relacionada aos campos de altitude.

Figura 19: Mapa de distribuição da vegetação e o uso do solo no município de Belo Horizonte



Fonte: Elaborado pelo autor.

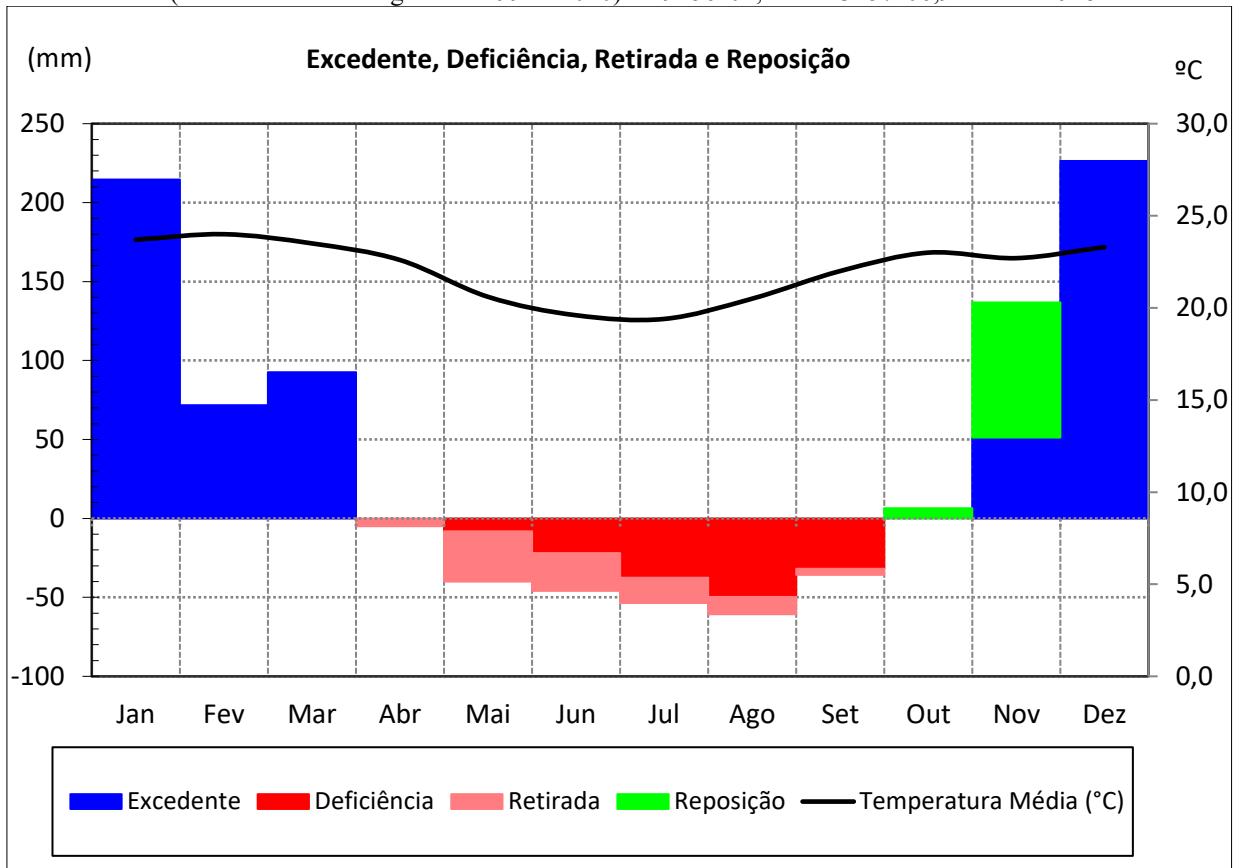
Por fim, falando do clima da cidade, segundo Assis (2012), ele pode ser dividido em dois, sendo definidos entre Tropical de Altitude na Depressão de Belo Horizonte e Tropical de Altitude das Serras do Quadrilátero Ferrífero, marcado por duas estações durante o ano: época chuvosa e de temperaturas altas (outubro a março) e época de seca com temperaturas mais brandas (abril a setembro). Sobre a média de chuvas, a precipitação anual é de 1490 mm, com 80% desse total sendo distribuído nos meses outubro a março (Vilela, 2007) (FIG.20

Os dados da normal climatológica 1991-2020 indicam que a precipitação na cidade de Belo Horizonte é bem-marcada nos meses de primavera/verão, com uma queda nos meses de outono e inverno austral. Os meses de junho e julho são caracterizados como os mais secos (11 e 5mm, respectivamente), em contrapartida os meses de dezembro e janeiro são os mais chuvosos (339 e 331 mm, respectivamente). A média anual para o total de precipitação é de 1.578mm. A temperatura para cidade não mostrou grandes variações, tendo os meses de verão os maiores valores, sendo os meses de janeiro e fevereiro os mais quentes, registrando 23,3°C e 24 °C respectivamente, e os meses de junho e julho, inverno, os menores valores com 19,6 °C e 19,4°C. As máximas podem superar os 35°C e as mínimas, próximo de 10°C. Já a temperatura média anual é a de 22,1°C. De acordo com a climatologia local os ventos são próximos de 1,4 m/s com direção predominantemente de leste.

Os valores obtidos no balanço hídrico, com base na normal climatológica 1991-2020, de acordo com a classificação climática de *Thorntwaite e Mather* (1955), indicam que, mesmo com a deficiência nos meses de abril a setembro (FIG.20), o excedente hídrico anual acaba sendo em cerca de 656 mm. Com base nas condições climáticas observadas acima, é esperado que, para os meses de abril a setembro, haja um déficit hídrico (FIG.20), que fica próximo de 150mm, período de estiagem (inverno). Os meses de outubro e novembro (parte), com a chegada das chuvas mais volumosas (110mm e 236 mm), trabalham com o mecanismo de reposição. De novembro (parte) em diante, o sistema já trabalha com o excedente hídrico até março.

Diante das características do balanço hídrico, o clima de Belo Horizonte pode ser classificado como Mesotérmico Úmido (Thorntwaite e Mather, 1955), já a classificação oficial do IBGE (2002) o clima da capital é considerado como Tropical – Subquente – Semiárido.

**Figura 20:** Balanço hídrico associado as temperaturas mensais do município de Belo Horizonte Belo Horizonte - MG ( Normais Climatológicas de 1991 - 2020) / 19° 56' 02,1"S e 43° 57' 06,9"W - Alt. 915m.

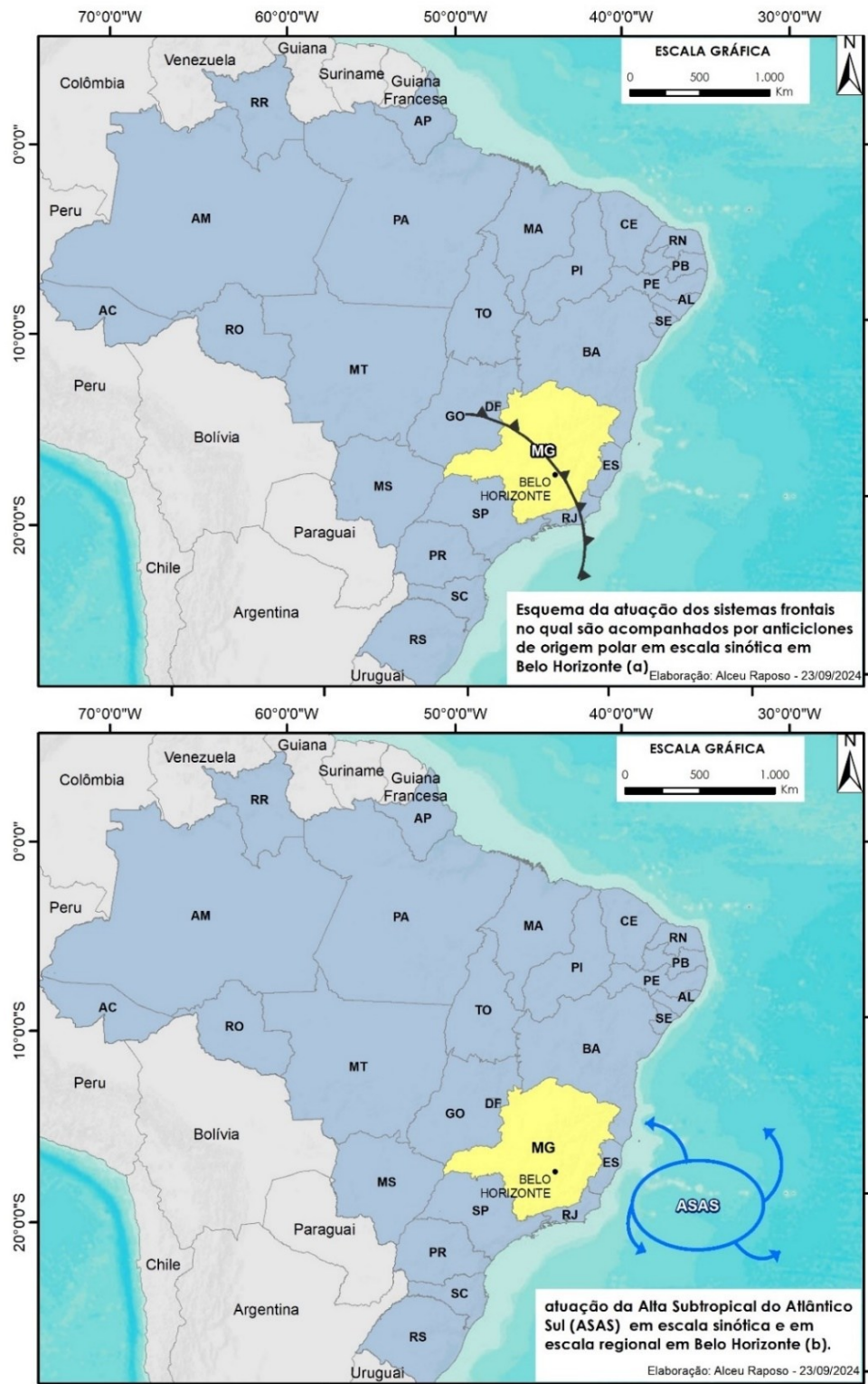


**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Tomando como base os sistemas de larga escala, o município de Belo Horizonte é afetado pela maioria dos sistemas sinóticos que atingem o sul do país, com algumas diferenças em termos de intensidade e sazonalidade do sistema. Também, as linhas de instabilidade pré-frontais, geradas a partir da associação de fatores dinâmicos de grande escala e características de mesoescala, são responsáveis por intensa precipitação durante o verão.

Os sistemas frontais que atuam durante o ano todo sobre a região são um dos maiores causadores de distúrbios meteorológicos na área, provocando elevados índices de precipitação. O deslocamento desses sistemas está associado ao escoamento ondulatório de grande escala. Esses sistemas frontais são originários das latitudes extratropicais e possuem vital importância para a climatologia da capital. Durante o verão, eles produzem instabilidade e forte nebulosidade associada. Os sistemas frontais são acompanhados por anticiclones de origem polar (FIG. 21).

**Figura 21:** Esquema da atuação dos sistemas frontais no qual são acompanhados por anticiclones de origem polar em escala sinótica em Belo Horizonte (a) e A atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) em escala sinótica e em escala regional em Belo Horizonte (b).



Fonte: Elaborado pelo autor

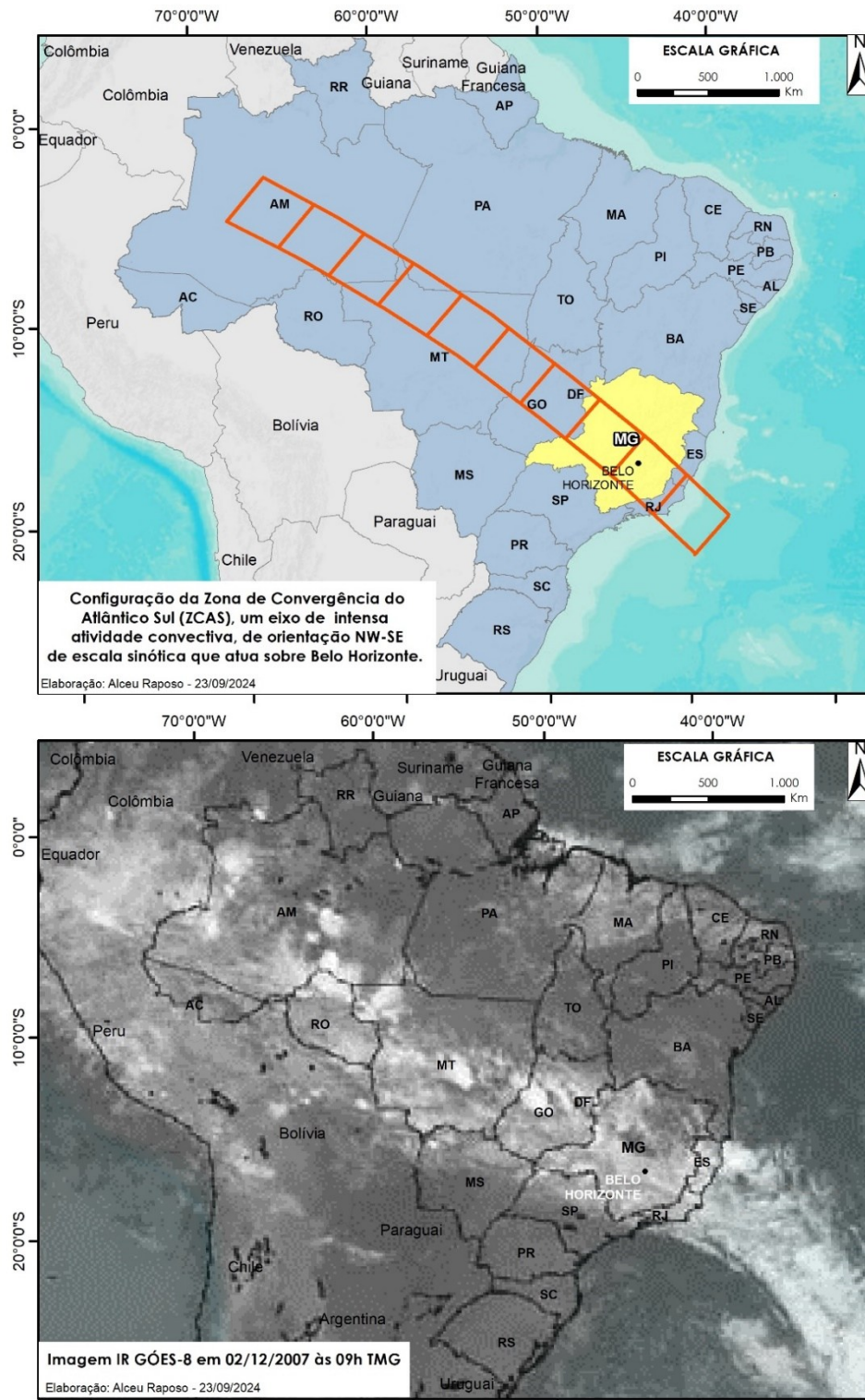
Durante o inverno, as atuações dos Anticiclones de origem polar produzem condições de queda das temperaturas e estabilidade ao sistema. Sob sua influência, registram-se as temperaturas mínimas absolutas nessa época do ano (Oliveira, 1986).

As baixas latitudes são dominadas por ventos predominantes de leste, originários do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que compõe o sistema de circulação de larga-escala. Sua forte influência é sentida durante todo o ano, impondo à região as características de sua área de origem. Sob sua influência, predominam-se condições de estabilidade atmosférica e temperaturas elevadas, fatos relativizados pela interação com a superfície subjacente. A predominância da atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), durante o período que se estende de abril a setembro, de modo em geral, garante a estabilidade atmosférica, períodos longos de insolação e baixa nebulosidade sobre toda a região em estudo.

O conhecimento das características estruturais da convecção tropical é importante para a compreensão da organização individual das células convectivas e sua interação com a circulação em grande escala. Vários tipos de sistemas foram estudados na década de 70 e início dos anos 80, definindo-se diferentes tipos de sistemas convectivos de mesoescala (SCM), tais como: linhas de instabilidade e Complexos Convectivos de Mesoescala.

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é outro sistema atmosférico de escala sinótica que afeta Belo Horizonte, responsável por grande parte do acumulado anual de precipitação no município. Vários estudos indicam a ZCAS como o principal fenômeno atmosférico típico de verão que acarreta altos índices pluviométricos em grande parte do território brasileiro (FIG.21). Sua principal característica é uma larga faixa de nebulosidade que se estende desde o sul da Região Amazônica até o Atlântico Sul-central (Oliveira, 1986).

**Figura 22:** Configuração da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um eixo de intensa atividade convectiva, de orientação NW-SE de escala sinótica que atua sobre Belo Horizonte. Imagem IR GÓES-8 em 02/12/2007 às 09h TMG.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A orientação NW-SE da ZCAS é determinada pela contribuição da FPA que, sobre o continente, apresenta essa mesma direção preferencial. As principais características dessa

faixa de nebulosidade são: advecção de ar frio, em baixos níveis, causada pela penetração do Sistema Frontal, que delimita a área de ocorrência da convecção tropical, movimento ascendente com o aumento da convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis, em que se forma a faixa de nebulosidade (Oliveira, 1986).

Os principais padrões atmosféricos ao interagirem podem se configurar em condições propícias a formação das ZCAS durante o verão. Em altos níveis, a presença de uma circulação anticiclônica fechada (Alta da Bolívia – AB), aquecimento continental que gera convergência de ventos em baixos níveis e divergência em altos e a presença de um Vórtice Ciclônico sobre o nordeste brasileiro, como um mecanismo compensatório. Em baixos níveis, a Baixa do Chaco, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), as linhas de instabilidades e a penetração de sistemas frontais até latitudes subtropicais (Oliveira, 1986).

Por fim, é importante ressaltar que ainda existem outros fenômenos de frequência menos intensa e mais irregular que atuam na região e provocam mudanças significativas nas condições atmosféricas local, os quais aqui não serão abordados.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Antes do detalhamento de todos os procedimentos e dos materiais utilizados para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa, representados aqui pelos subtópicos deste capítulo, faz-se necessário fazer uma breve introdução sobre a estrutura geral.

Com base na hipótese inicial a ser testada sobre a existência de “bolsões de poluição”, “bacias atmosféricas” ou “bacias aéreas” existentes em áreas urbanas, tem-se inicialmente um importante trabalho de levantamento bibliográfico dos conceitos científicos sobre a temática da poluição urbana e de seus processos. O fluxograma (FIG.23) a seguir demonstra, de forma sistêmica, o sequenciamento metodológico proposto para esta pesquisa. Já o detalhamento dos métodos e materiais estão ao longo dos subcapítulos a seguir.

Na sequência, para o desenvolvimento da pesquisa, tem-se como fundamental a escolha da área de estudo, com vistas a escolher um ambiente urbano que pudesse agregar elementos espaciais, antrópicos e ambientais para esta análise. Nesse sentido, a capital Belo Horizonte, dada às suas características de metrópole com fluxos intensos, rugosidade específica do terreno (diversificada topografia), condições de usos e ocupação do solo, características geográficas e morfológicas, foi escolhida como uma importante área de estudo para este objeto de análise.

A etapa seguinte se baseou na definição das principais vias de circulação que seriam alvo das investidas de campo, em especial aquelas que compusessem características apropriadas à busca dos objetivos propostos, ou seja, intenso fluxo de veículos (altas taxas de emissão), densidade do uso do solo, diversidade de usos, topografia variada e extensa representatividade geográfica (extensão) dentro do município. Após a definição dos principais corredores de circulação, a etapa seguinte foi o mapeamento dos pontos ao longo de cada via de forma a se ter representatividade e padronização dos pontos, conforme padrões científicos consagrados, tais como distanciamento de obstáculos, distância entre as fontes emissoras, árvores, altura dos equipamentos etc.

Após a escolha das vias e dos locais em cada uma delas, a etapa metodológica seguinte foi a escolha da estação de qualidade do ar móvel que pudesse atender aos rigores da pesquisa e, ao mesmo tempo, fosse de fácil transporte, manuseio, leitura, confiabilidade dos dados, capaz de fazer leituras em ambientes externos, com autonomia de energia e leitura automática (digital).

A fase seguinte foi de padronização da microlocalização da estação nos pontos de monitoramentos escolhidos previamente, visando ao maior rigor científico dos métodos para todos os pontos que fossem ser monitorados. Adicionalmente, o tempo de cada coleta igual para

todos, as condições de tempo atmosférico, os métodos de validação dos dados de campo, as planilhas de coleta das concentrações e a definição do sensor de coleta como base para todas as leituras.

Cumpridas as devidas etapas acima, os monitoramentos em cada uma das vias e seus respectivos pontos seguiram-se ao longo de duas campanhas, uma no período de seca (agosto/setembro de 2022) e outra no período de chuvoso (outubro/novembro de 2023).

Os dados das coletas das concentrações em campo foram repassados posteriormente para planilhas em Excel com todos os pontos georreferenciados previamente. Os dados, então, foram confrontados com as características meteorológicas de cada região (canais de escoamento, fluxo de ventos, umidade relativa e temperatura), com as características topográficas do terreno, bem como o uso e ocupação do solo. Posteriormente, importantes análises de correlações espaciais por meio de ambientes GIS foram elaboradas.

O resultado da pesquisa é uma análise sistêmica de vários fatores ambientais que conjugados possam oferecer melhor compreensão da existência ou não dos fenômenos de “bolsões de poluição”, “bacias atmosféricas” ou “bacias aéreas” a serem testados em Belo Horizonte.

#### **4.1 Introdução geral**

No capítulo anterior, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a origem e os conceitos dos termos *Ilhas de Poluição Urbana*, *Ilhas de Neblina* e *Bacias Aéreas*. Assim, foi possível identificar o arcabouço metodológico acerca de cada um dos termos, sendo possível conceber qual o contexto histórico e quais os mecanismos que levaram os pesquisadores a usarem os termos aqui retratados.

Desse modo, foi possível compreender que os termos *Ilhas de Poluição* e *Ilhas de Neblina* foram testados em pesquisas, tendo como base geográfica algumas cidades Chinesas, usando métodos indiretos de avaliação da qualidade do ar, por meio do uso de geoprocessamento como ferramenta principal. Para quantificar as chamadas IPU, os autores geraram áreas de anéis concêntricos (*buffers*) que se expandem radialmente desde a área urbana em direção à periferia. Os *buffers* foram gerados a partir da metade do tamanho da área urbana e definidos como a unidade de medida em que a IPU se expande. No Brasil e na Europa, alguns pesquisadores incluíram, em suas análises, os sensores de satélite para a medição indireta da qualidade do ar, combinando com dados de satélite e de superfície.

Já o termo *Bacias Aéreas* foi, inicialmente, utilizado para realizar o Inventário de Fontes Emissoras de Poluentes Atmosféricos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (2004), usado para designar as sub-regiões que seriam inventariadas. Nesse sentido, o termo foi criado para um gerenciamento do órgão ambiental, buscando, primeiramente, conhecer as emissões em cada porção do território fluminense. Nesse cenário, ao que tudo indica, a relação com o termo “bacia”, que vem, originalmente, da alusão de “bacia hidrográfica”, parece ter pouca aderência aos mesmos critérios fundamentais para a definição de uma bacia hidrográfica, uma vez que a intencionalidade do termo, a princípio, perpassava por dar suporte territorial para realização de inventários de emissões atmosféricas em uma dada porção territorial.

Dentro dessa perspectiva, observa-se que as pesquisas realizadas com as *Ilhas de Poluição Urbana*, *Ilhas de Neblina* e *Bacias Aéreas* foram realizadas, essencialmente, por métodos indiretos com o uso de imagem de satélite ou de geoprocessamento. Já as pesquisas um pouco mais práticas, com vistas a qualificar o fenômeno da poluição atmosférica, em geral, fazem uso de estações governamentais pontuais (fixas) de qualidade do ar, aliado a métodos indiretos como a krigagens (interpolações). De maneira geral, a maioria dos estudos aponta para a busca de um método que seja capaz de explicar o fenômeno poluição urbana com procedimentos sobre a ótica de uma dimensão espacial de pequena escala, ou seja, a tentativa de reproduzir o micro para grandes dimensões territoriais.

Nesse contexto, é importante ressaltar como foi amplamente discutido, no âmbito da revisão bibliográfica, que o fenômeno poluição urbana aponta para uma complexidade no campo da fenomenologia, uma vez que possui forte interação com as condições atmosféricas regionais (sistemas de larga escala), locais (microclima ou topoclima), com a geografia do tecido urbano e a arquitetura das edificações.

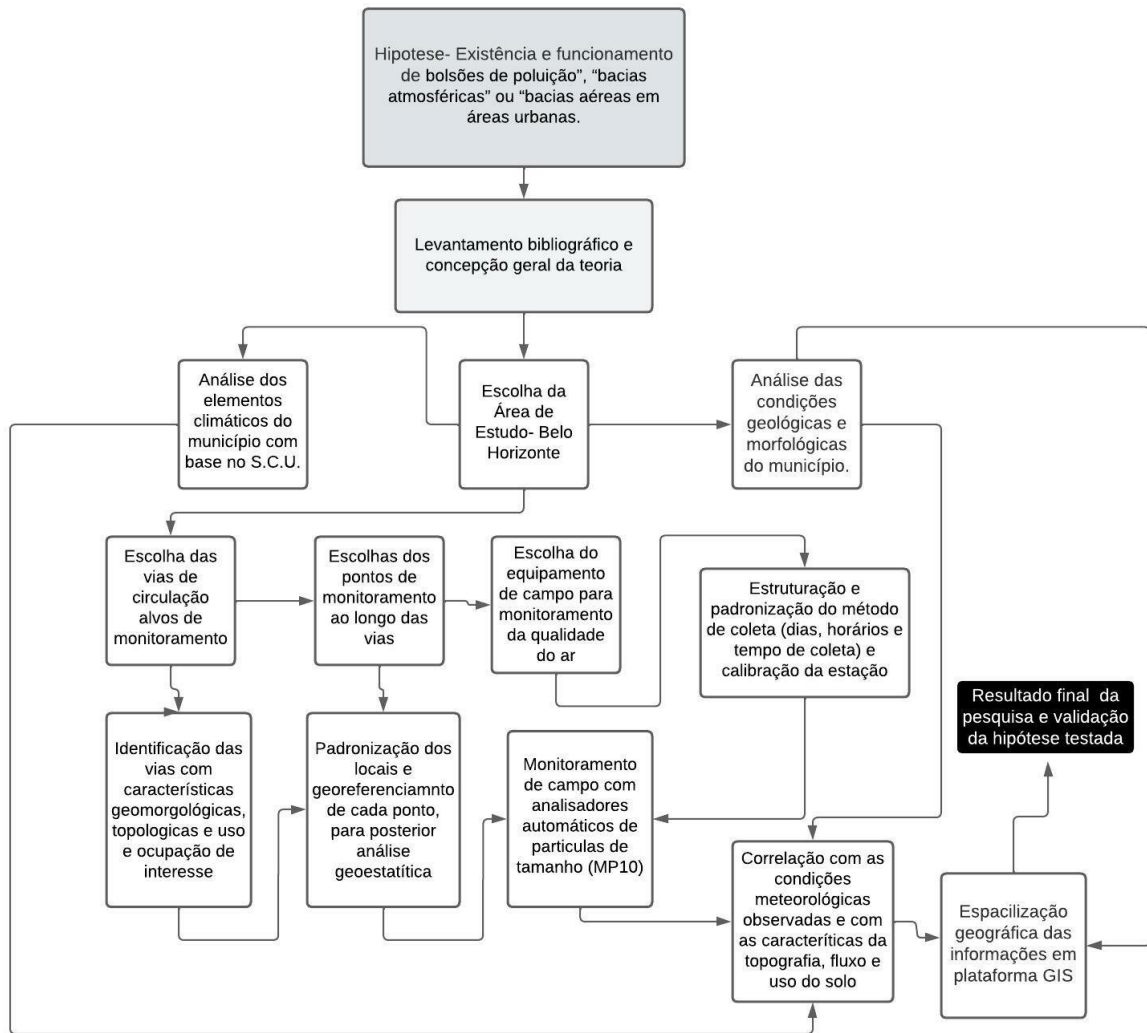
É nesse âmbito que esta pesquisa aponta seu caráter inovador e desafiador ao se debruçar sobre o território levando em consideração a dimensão geográfica do tecido urbano (topografia, morfologia, uso do solo e condições meteorológicas), o monitoramento direto móvel, por meio do uso de estação automática móvel sobre várias ruas e avenidas de Belo Horizonte. A medição da qualidade do ar, usando estação automática em percursos móveis em um mesmo intervalo de tempo, apresenta desafios metodológicos e de logística importantes que tiveram de ser sanados por meio de testes e de validações iniciais para construir o método considerado ideal para viabilizar as medições em campo. Ao todo, foram gastos 12 meses de pesquisas e de testes em campo para se chegar ao método mais adequado para realização das coletas móveis em campo.

Outro caráter inovador para esta pesquisa diz respeito aos custos e a dificuldades de acesso a uma estação móvel automática de qualidade do ar que, no Brasil, até então, não se tinha disponível e teve que ser importada. Existe ainda os serviços adicionais de calibração e de certificação que são a parte do equipamento e precisam ser rigorosamente validados por uma terceira parte. Neste sentido, a pesquisa foi realizada graças a parceria com uma empresa representante no Brasil deste tipo de equipamento e emprestou o equipamento sem nenhum custo durante todo o tempo de pesquisa.

Antes do detalhamento de todos os procedimentos e materiais utilizados para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa, apresentados aqui pelos subtópicos deste capítulo, faz-se necessário fazer uma breve introdução sobre a estrutura geral metodológica construída para a elaboração desta pesquisa.

#### **4.2 Sequenciamento Metodológico Proposto**

Com base na hipótese inicial a ser testada sobre a existência de *Ilhas de Poluição Urbana*, *Ilhas de Neblina* ou *Bacias Aéreas* existentes em Belo Horizonte, tem-se inicialmente um importante trabalho de levantamento bibliográfico dos conceitos científicos sobre a temática poluição urbana e seus processos. O fluxograma (FIG.23) a seguir demonstra, de forma sistêmica, o sequenciamento metodológico proposto para esta pesquisa.

**Figura 23:** Fluxograma geral da pesquisa

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na sequência, para o desenvolvimento da pesquisa, tem-se como fundamental a escolha da área de estudo, com vistas a escolher o ambiente urbano que pudesse agregar elementos espaciais, antrópicos e ambientais para esta análise. Nesse prisma, a cidade de Belo Horizonte, dadas suas características de metrópole com fluxos intensos, rugosidade específica do terreno (diversidade topográfica), condições de usos e ocupação do solo, reuniu substancialmente características geográficas importantes de forma que pudesse ser escolhida como uma área de estudo a ser testada as hipóteses da pesquisa.

A etapa seguinte se baseou na definição das principais vias de circulação que seriam alvo das investidas de campo, em especial aquelas que compusessem características apropriadas na busca dos objetivos propostos, ou seja, intenso fluxo de veículos (altas taxas de emissão), densidade do uso do solo, diversidade de usos, topografia variada e extensa representatividade

geográfica (extensão) dentro do município. Para a etapa do critério de seleção, foi necessário o uso de imagem de satélite do município de Belo Horizonte sobreposta com a base (*shapes*) das vias de circulação do município. Como ferramenta de suporte, foi utilizado o *ArcGis*<sup>14</sup>.

Após a definição dos principais corredores de circulação que congregassem as características elencadas para a seleção, a etapa seguinte foi o mapeamento dos pontos ao longo de cada via, de forma a se ter representatividade e padronização deles, conforme padrões científicos consagrados, tais como distanciamento de obstáculos, distância entre as fontes emissoras, árvores, altura dos equipamentos, entre outros. (MMA<sup>15</sup>, 2019). Esse detalhamento será retomado nos subcapítulos a seguir.

Os pontos escolhidos foram devidamente georreferenciados em campo por meio de GPS do modelo *GPS eTrex 32x*, pré-carregado com mapas com estradas e trilhas navegáveis, Ecrã a cores de 2,2" legível sob luz solar com resolução de 240x320 *pixels*. Os pontos, posteriormente, foram baixados no *ArcGis* para montagem da base de dados de campo e para elaboração dos mapas temáticos a posterior

A definição da estação automática em detrimento das estações fixas institucionais com dados disponíveis se deu justamente por atender ao critério elementar desta pesquisa que buscava compreender o comportamento das emissões urbanas de forma particularizada, com vistas a correlacionar os resultados com a topografia local, a densidade do uso do solo, a circulação dos fluxos viários e, por vezes, as questões climáticas locais. Assim, como já visto, as estações fixas são usadas, em sua maioria, como ferramentas de controle governamental para análise da qualidade do ar regional ou para representar uma extensa porção territorial.

A fase seguinte foi de padronização da “microlocalização” do posicionamento da estação de qualidade do ar para cada um dos pontos escolhidos previamente, ou seja, a definição exata onde a estação deveria ser posicionada em campo, visando maior rigor científico do método, para que todos os pontos fossem monitorados dentro do mesmo procedimento. O detalhamento dos critérios estabelecidos para os métodos de coleta está detalhado nos subcapítulos a seguir.

Adicionalmente, foram realizados vários testes em campo e em laboratório para validar o melhor intervalo de tempo de coleta, uma vez que não era possível para o método de medição móvel proposto permanecer 24 horas de coleta em cada ponto, obtendo, assim, uma média diária, conforme estabelecido pela Resolução Conama 506/2024. O desafio era completar um

---

<sup>14</sup> ArcGIS é um software de elaboração de mapas e gestão de dados espaciais, uma das principais plataformas de tecnologia de sistema de informação geográfica (GIS).

<sup>15</sup> Ministério do Meio Ambiente

ciclo de medição ao longo de uma via dentro de um intervalo de tempo que fosse ao mesmo momento representativo do ponto de vista da circulação viária daquela região em um dado tempo cronológico e que tivesse, em princípio, as mesmas condições de tempo meteorológico. Em resumo, um ciclo de coleta deveria ter um “tempo cronológico ótimo”, um “tempo meteorológico ótimo” e poucas oscilações no fluxo de veículo ao longo da medição.

Dessa forma, ficou estabelecido como método que um ciclo de medição deveria ser invalidado caso as três condições pilares acima destacadas fossem observadas. Nesse cenário, para cada ciclo de medição realizada, era necessária a validação das condições meteorológicas, do tempo ótimo e da validação do cenário das condições viárias por meio dos dados da BHTrans, bem como da constatação de campo. O detalhamento dos critérios estabelecidos, o tempo de coleta, as condições viárias e as condições meteorológicas estão detalhadas nos subcapítulos a seguir.

Outro critério básico, mas ao mesmo tempo muito importante a ser definido, foi o período das campanhas de campo, uma vez que, segundo as referências bibliográficas, as condições meteorológicas são fundamentais levantamentos relacionados à poluição atmosférica. Segundo as referências bibliográficas, os períodos de chuva tendem a trazer resultados de concentração de poluentes atmosféricos menores que nos períodos de estiagem. Nessa ótica, restou a decisão da realização dos levantamentos de campo em dois períodos distintos: seca e chuva (inverno e verão). O detalhamento de cada mês escolhido e os critérios estabelecidos também serão tratados nas suas particularidades nos subcapítulos a seguir.

O método logístico para locomoção com os equipamentos entre um ponto e outro de coleta também foi importante e necessitou ser validado em campo durante alguns meses antes das campanhas oficiais. Os testes indicaram que, para o deslocamento entre as vias, muitas delas de grandes extensões, de fato, seria necessário que o deslocamento tivesse que ser feito por veículo motorizado e, dessa forma, foi utilizado um veículo leve para o transporte do material e do técnico em campo. Importante ressaltar que, durante o monitoramento, o veículo não estivesse funcionando como barreira física diante da estação de qualidade do ar, nem estivesse ligado para não influenciar nas emissões que estavam sendo coletadas.

Utilizando base georreferenciada (Sirgas, 2000), os ciclos de monitoramento em campo puderam ser rigorosamente realizados, assegurando que os mesmos pontos geográficos estariam sendo visitadas conforme seleção pré-campo. Nesse âmbito, o protocolo adotado para cada ponto visitado deveria ser validado pelas coordenadas geográficas de cada um dos pontos que foram devidamente codificados (1...n).

A coleta dos dados em campo foi realizada de forma direta, uma vez que se tratava de uma estação de dados automáticos, que, por sua vez, enviava as informações diretas para um *notebook* acoplado a ela. Os dados das coletas das concentrações em campo foram repassados a um banco de dados em *Excel* para ser, posteriormente, realizados os dados estatísticos dos resultados obtidos.

Cumpridas todas as etapas procedimentais e de padronização para a coleta dos dados em campo, atendendo um rigoroso método de coleta, surge, então, o *core* da pesquisa. Já em laboratório, os dados finais, desse modo, foram confrontados com as características meteorológicas de cada região (canais de escoamento, fluxo de ventos, umidade relativa e temperatura) usando a estação oficial do INMET da Pampulha<sup>16</sup>, com as características topográficas do terreno (bases oficiais com as curvas de nível)<sup>17</sup>, bem como com o uso e a ocupação do solo (bases oficiais da PBH)<sup>18</sup>. Essas informações foram importantes para a realização de análises de correlações espaciais entre os dados coletados e as condições meteorológicas, topográficas e de usos de solo de cada ponto monitorado. Nessa etapa, estava a parte principal da pesquisa da qual seria possível extrair as informações para os objetivos propostos do trabalho, que consistem em entender o comportamento e a dinâmica da poluição atmosférica em ambientes densamente urbanizados, em especial, a existência dos “*bolsões de poluição*”, “*bacias atmosféricas*” ou “*bacias aéreas*” na cidade de Belo Horizonte.

O resultado da pesquisa é uma análise sistêmica de vários fatores ambientais que conjugados possam oferecer melhor compreensão da existência ou não dos fenômenos de “*bolsões de poluição*”, “*bacias atmosféricas*” ou “*bacias aéreas*” a serem testados em Belo Horizonte.

#### **4.3 Seleção dos materiais e métodos para cada escala climática do trabalho**

Conforme pode ser visto ao longo da revisão bibliográfica, o fenômeno da poluição atmosférica possui forte influência das condições meteorológicas atuantes em uma região. Foi possível ainda constatar que a influência atmosférica se dá em seus diversos níveis escalares, desde os sistemas de mesoescala, atuando sobre uma região, até mesmo, em escalas menores como o microclimático.

---

<sup>16</sup> O código da estação meteorológica de Belo Horizonte (Pampulha) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é A521.

<sup>17</sup> Bases oficiais obtidas em <https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo/acervo-cartografico>

<sup>18</sup> Bases oficiais obtidas em <https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo/acervo-cartografico>

Diante desse cenário, foi necessário que os materiais e os métodos de análise da pesquisa perpassassem por uma investigação em seus diversos níveis escalares, de modo a compreender quais fenômenos estavam atuando em mesoescala e como eles poderiam estar influenciando os dados de microescala. Nesse sentido, as dimensões espaciais e a transição entre as unidades climáticas utilizadas nesta pesquisa foram definidas de forma conceitual, utilizando-se balizadores do comportamento médio dos parâmetros meteorológicos, os fluxos de energia estabelecidos pelas diferentes superfícies e a configuração topográfica de Belo Horizonte de forma a definirem a ordem de grandeza dessas unidades. Dessa maneira, optou-se pelas seguintes categorias de escalas climáticas (FIG.24).

**Figura 24:** Escalas Climáticas selecionadas para a pesquisa

<b>Clima local</b>	 <p>Corresponde à influência das duas principais unidades geomorfológicas do município de Belo Horizonte (Formação Ferrífera e Depressão de Belo Horizonte), assim como ao comportamento atmosférico integrado de grandes porções do tecido urbano da capital.</p>
<b>Mesoclima</b>	 <p>Corresponde à atuação de importantes barreiras geográficas (exemplo. Serra do Curral) existentes no município ou mesmo das porções deprimidas da região norte da capital, bem como aos grandes bairros e avenidas de grandes extensões.</p>

**Topoclima**



Corresponde aos locais com comportamentos microclimáticos parecidos ao nível da camada de cobertura urbana (UCL). Podem estar associados ao uso do solo (área residencial, área comercial, área industrial, área verde, área concretada) ou a condições topográficas específicas (um divisor de água, pequeno vale, colina, vertente).

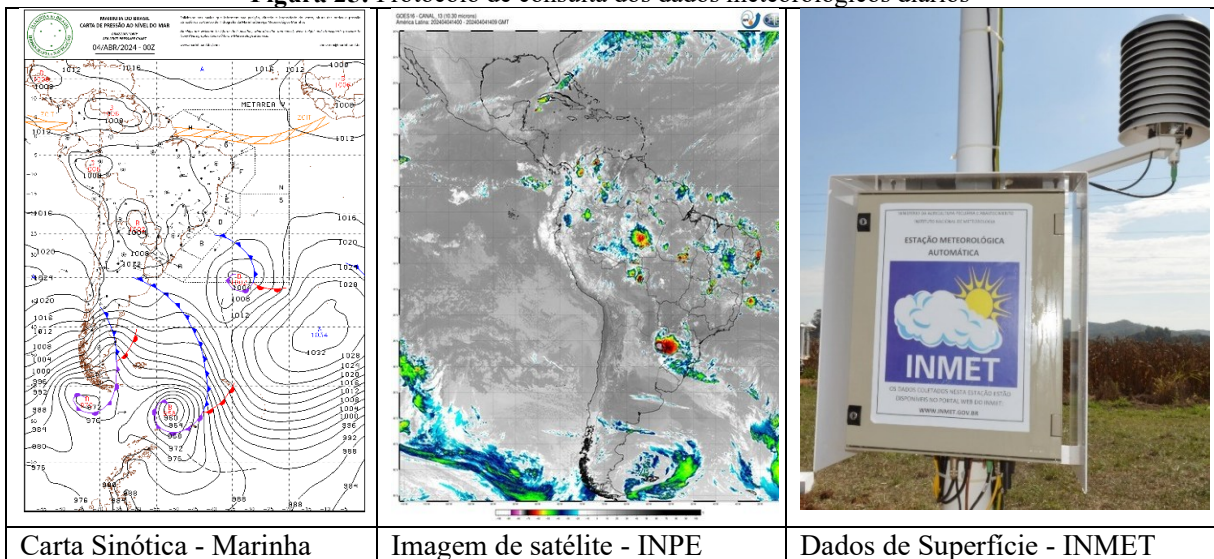
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Como base nesses princípios escalares, os dados meteorológicos coletados foram sistematizados por meio das informações dos satélites meteorológicos<sup>19</sup>, das cartas sinóticas da Marinha<sup>20</sup>, dos boletins meteorológicos e dos dados de superfície<sup>21</sup>. Para cada dia de levantamento de dados, foi realizado uma coleta e uma análise dos dados meteorológicos com base no seguinte protocolo montado (FIG.25).

<sup>19</sup> <https://satellite.cptec.inpe.br/home/index.jsp>

<sup>20</sup> <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>

<sup>21</sup> <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A001>

**Figura 25:** Protocolo de consulta dos dados meteorológicos diários

**Fontes:** <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas/>;

<https://www.cptec.inpe.br/mg/belo-horizonte> e <https://portal.inmet.gov.br/servicos/esta%C3%A7%C3%B5es-autom%C3%A1ticas>.

Para os dados de superfície, foi escolhida a estação automática INMET localizada na Pampulha (A521)<sup>22</sup>, dentro do campus da UFMG - Estação Ecológica. A escolha dessa estação se deu pelo fato de ser a estação automática que melhor representa as condições climáticas de Belo Horizonte. Uma outra opção seria a estação INMET da Av. Raja Gabaglia (83587)<sup>4</sup>, a qual reúne a mesmas condições de representar o clima de Belo Horizonte, especialmente a porção mais urbanizada. Contudo, trata-se de uma estação convencional, a qual não possui as facilidades na obtenção dos dados diários como se faz necessário para esta pesquisa.




Os QUADROS 4 e 5 apresentam a organização das informações, contendo as campanhas realizadas, os dias de coleta de campo, seus respectivos horários de coleta com as informações de disponibilidade de dados meteorológicos usados para compor as análises.

A definição para a escolhas das vias se deram em função de algumas premissas básicas para os objetivos propostos sendo elas as seguintes características: i) ter representatividade espacial no município de Belo Horizonte; ii) ter um fluxo de veículo elevado reconhecidamente pelos órgãos municipais; iii) ter diferenças topográficas consideráveis entre o seu transecto; iv) ter um fluxo de veículo relativamente homogêneo ao longo de toda a via, em condições ideais não poderia ter um fluxo alto em um determinado trecho e um baixo em outro (exemplo: Av. Afonso Pena); v) apresentar condições de usos e ocupação do solo diversificado ao longo do

<sup>22</sup> Designativo INMET para a estação meteorológica.

transecto; e por fim, v) oferecer condições de acessibilidade para parada de veículo e instalação/desmobilização de equipamento de forma rápida e segura ao pesquisador.

**Quadro 4:** Esquema de organização do banco de dados meteorológico de acordo as coletas realizadas – Primeira Campanha (Inverno)

Campanha	Local de coleta	Data de coleta	Horário de coleta	Dados Meteorológicos coletados
Primeira (inverno)	Av. Amazonas	01/08/2022	8:30 às 13:00	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Primeira (inverno)	Av. Nossa Sra. Carmo	02/08/2022	18:30 às 21:00	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Primeira (inverno)	Av. Silva Lobo e Av. Barão Homem de Melo	03/08/2022	8:30 às 10:00	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Primeira (inverno)	Av. Silva Lobo e Av. Barão Homem de Melo	03/08/2022	19:30 às 20:30	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Primeira (inverno)	Rua Padre Eustáquio	05/08/2022	19:30 às 20:30	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Primeira (inverno)	Av. Pres. Antônio Carlos	08/08/2022	19:00 às 20:30	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Primeira (inverno)	Anel Rodoviário	20/09/2022	08:30 às 10:00	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Quadro 5:** Esquema de organização do banco de dados meteorológico de acordo as coletas realizadas – Segunda Campanha (Verão)

Campanha	Local de coleta	Data de coleta	Horário de coleta	Dados Meteorológicos coletados
Segunda (Verão)	Av. Amazonas	30/10/2023	8:30 às 13:00	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Segunda (Verão)	Av. Nossa Sra. Carmo	06/11/2023	18:30 às 21:00	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Segunda (Verão)	Av. Silva Lobo e Av. Barão Homem de Melo	01/11/2023	8:30 às 10:00	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Segunda (Verão)	Av. Silva Lobo e Av. Barão Homem de Melo	01/11/2023	19:30 às 20:30	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Segunda (Verão)	Rua Padre Eustáquio	10/11/2023	19:30 às 20:30	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Segunda (Verão)	Av. Pres. Antônio Carlos	06/11/2023	19:00 às 20:30	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície
Segunda (Verão)	Anel Rodoviário	07/11/2023	08:30 às 10:00	 Carta Sinótica  Satélite Meteorológico  Dados de Superfície

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Conforme revisão bibliográfica, algumas variáveis meteorológicas possuem interação maior ou menor com as condições de qualidade do ar nas áreas urbanas. Nesse sentido, o QUADRO 6 apresenta as variáveis meteorológicas selecionadas nesta pesquisa para compor as análises do comportamento da atmosfera durante o ciclo das campanhas de campo.

**Quadro 6:** Variáveis meteorológicas selecionadas para as análises de campo

Variável meteorológica	Unidade medida	Mecanismos de interação
Temperatura do bulbo seco	°C	A temperatura do ar funciona como mecanismo de ascensão do ar atmosférico, podendo contribuir para sua dispersão quando ascendente ou concentração quando de inversões térmicas.
Umidade Relativa do ar	%	A umidade relativa do ar atua como mecanismo de aglutinação de poluentes na atmosfera, podendo atuar como acelerador da sedimentação de particulados em superfície, por exemplo.
Radiação	kW/m <sup>2</sup>	A radiação solar induz o aquecimento atmosférico basal na camada laminar, proporcionando a convecção térmica, que, por sua vez, é essencial para a dispersão de poluentes.
Precipitação	mm	A precipitação funciona como importante mecanismo de lavagem de poluentes na atmosfera.
Velocidade do vento	m/s	O vento funciona como mecanismo de transporte mecânico da poluição de um lugar para o outro, podendo influenciar negativamente ou positivamente na qualidade do ar.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Descrição dos materiais e dos equipamentos

As estações de qualidade do ar institucionais em geral são grandes contêineres que são instaladas em um terreno geralmente ligado ao poder público (escolas, batalhão de polícia, departamento de estado etc.). Possuem alto custo de aquisição e manutenção, geralmente, variando entre quinhentos e um milhão de dólares. Os valores elevados têm tido como resultado o abandono delas pelo poder público, por falta de recursos para sua manutenção. São, em sua maioria, dotadas de uma cápsula radioativa em que se faz a leitura por meio de uma espécie de Raio X.

Nessa ótica, a opção por uma estação de qualidade do ar automática, com leitura a laser multicanal, deu-se pelo menor custo, se comparado às estações institucionais padrões, pois ainda são equipamentos bastante onerosos para os padrões brasileiros. Outro fator importante que influenciou na seleção foi o tamanho do equipamento e as suas dimensões, as quais foram projetadas pelo fabricante justamente para realização de medições móveis em campo.

Diante dessa pré-seleção, o modelo da estação selecionada para a realização dos monitoramentos da qualidade do ar em Belo Horizonte se deu pela estação móvel automática denominada de *DustTrak™* produzida nos EUA pela empresa *TSI<sup>23</sup> Incorporated* (FIG. 26).

**Figura 26:** Equipamento DRX Aerosol Monitor 8533.



Fonte: <https://tsi.com>.

O *DustTrak™ DRX Aerosol Monitor 8533* pode medir, simultaneamente, a fração de massa e de tamanho. O monitor de *desktop DustTrak DRX*, utilizado nesta pesquisa, é um fotômetro a laser multicanal, operado por bateria de lítio de longa duração, com registro de dados e dispersão de luz que fornece leituras de massa de aerossol por meio da coleta de uma amostra gravimétrica em tempo real. Ele usa um sistema de ar de bainha que isola o aerossol na câmara ótica para manter a ótica limpa com maior confiabilidade e baixa manutenção. O monitor *DustTrak DRX* mede contaminantes aerossóis, poeira, fumaça, vapores e névoas. Segundo o manual, o equipamento é adequado para pesquisas científicas, trabalhos industriais agressivos, monitoramento de construção civil, pesquisas ambientais e outras aplicações externas e internas. A empresa fabricante do equipamento (TSI) possui bastante notoriedade nos EUA onde foi constituída ainda na década de 60. Por volta dos anos 90, a TSI recebe seus primeiros contratos para desenvolver e produzir instrumentos dimensionadores, partículas

---

<sup>23</sup>A TSI é uma das maiores empresas do mundo na elaboração de sensores e medidores industriais e militares desde a década de 60. Um dos seus primeiros projetos foram os sensores de velocidade do vento - ou anemômetro - sensível a ventos fracos e a ventos em uma atmosfera de baixa densidade, sendo seu destaque o desenvolvimento de 60 anemômetros criados para a NASA, seis seguiram para Marte, instalados na espaçonave *Viking*.

aerodinâmicas para o Exército dos EUA e o Exército Canadense. Esses instrumentos detectam a presença de materiais com risco biológico no ar.

Dentre os parâmetros que a estação automática *Dust Track* é capaz de medir de forma individualizada (PTS<sup>24</sup>, PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>), foi adotado o sensor de medição para as partículas de tamanho PM<sub>10</sub> (FIG. 26), uma vez que as referências bibliográficas sugerem que as emissões veiculares são, em geral, melhor representadas nessa dimensão, bem como pela sua importância médica, já devidamente também abordada nos referências teóricos, tais como: Riojas-Rodríguez *et al.* (2016); Anjos *et al.* (2018); Santos *et al.*, (2021); Schikowskit *et al.*, (2005); Samoli *et al.*, (2011); Künzli *et al.*, (2009); Arbex *et al.*, (2009), entre outros.

O QUADRO 7 apresenta uma breve descrição técnica do equipamento *DustTrak DRX* utilizado em campo.

**Quadro 7:** Descrição Técnica do DustTrak DRX

Sistema incorporado	Breve descritivo técnico
Tipo de amostragem	Mede simultaneamente as concentrações de fração de massa segregada por tamanho. Realiza amostragem gravimétrica em linha para calibrações de referência personalizadas.
Tamanho de partículas	Correspondentes a PM <sub>1</sub> , PM <sub>2,5</sub> , respirável, PM <sub>10</sub> e frações de tamanho total de PM. Faixa de concentração de aerossol 0,001 a 150 mg/m <sup>3</sup> .
Ajuste	Ponto de ajuste do alarme <i>STEL</i> .
Tela de operação	Interface de tela sensível ao toque.
Sistema operacional	<i>Software</i> de análise de dados <i>TrakPro</i> . Funções de registro de dados manuais e programáveis. A zeragem automática (com módulo zero opcional) minimiza o efeito do desvio do zero.
Cabine	Protegido ambientalmente e à prova de adulteração com gabinete ambiental. Unidade de mesa com bateria e adaptador AC.

**Fonte:** <https://tsi.com>

<sup>24</sup> Partículas Totais em Suspensão

**Figura 27-** Detalhe do aparelho com abertura para medição do ar em 10 microns.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

As partículas PTS, em função do seu tamanho, têm potencial de risco menor por terem baixa capacidade de penetrar nas vias aéreas inferiores. Além disso, as emissões veiculares (combustão) em média não geram partículas de dimensões grandes ( $> 10$  microns). Já as partículas mais finas ( $< 2,5$  microns), apesar de possuírem alto potencial de complicações médicas devido à capacidade delas de penetrarem nos pulmões e na corrente sanguínea, para as medições do objetivo proposto, ao serem utilizadas, reduzem a possibilidade de se captar e analisar em teoria as partículas de ressuspensão mais grossas, não somente as provenientes de combustão, tais como: os minerais, os restos de borracha de pneu, os resíduos de asfalto etc.

Segundo o Guia Técnico para Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar (MMA, 2019, p. 19), as emissões provenientes de vias de tráfego são liberadas pela combustão dos motores dos veículos e pela ressuspensão da poeira depositada no solo, que contribuem para os níveis de material particulado na atmosfera em suas diversas frações de tamanho.

Por esses motivos, as partículas de  $PM_{10}$  foram selecionadas para esta pesquisa como o recorte possível de ser feito para entender o comportamento da poluição atmosférica em Belo Horizonte. Importante salientar que os demais tamanhos de partícula, como por exemplo PTS e  $PM_{2,5}$ , bem como os gases poluentes, não possuem sua importância médica descartada e nem desmereçam ser estudadas, pois aqui era necessário fazer uma escolha diante do universo amostral possível e dos esforços para sua realização. Outro fator muito importante para a escolha do tamanho da partícula de  $PM_{10}$  foi o fato de que as estações fixas da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) disponibilizam acesso apenas das partículas  $PM_{10}$  e outros gases, não sendo possível correlacionar posteriormente as

medições de campo das estações móveis com as fixas, para demais tamanhos de partículas (PM<sub>2,5</sub> e PTS).

O *DustTrak™ DRX Aerosol Monitor 8533* (FIG. 28) pode medir simultaneamente a fração de massa e de tamanho. O monitor de *desktop DustTrak DRX*, utilizado nesta pesquisa, é um fotômetro a laser multicanal, operado por bateria de lítio de longa duração, com registro de dados e dispersão de luz que fornece leituras de massa de aerossol por meio da coleta de uma amostra gravimétrica em tempo real. Ele usa um sistema de ar de bainha que isola o aerossol da câmara ótica para manter a ótica limpa com maior confiabilidade e baixa manutenção. O monitor *DustTrak DRX* mede contaminantes aerossóis, poeira, fumaça, vapores e névoas. Segundo o manual, o equipamento é adequado para pesquisas científicas, trabalho industriais agressivos, monitoramento de construção civil, pesquisas ambientais e outras aplicações externas e internas.

Para efeitos de sua correta funcionalidade foi necessário proceder a calibração da mesma conforme os padrões internacionais, desta forma o certificado de calibração encontra-se no ANEXO A.

**Figura 28:** Equipamento DRX Aerosol Monitor 8533



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Já a escolha das estações fixas de qualidade do ar, sob responsabilidade atualmente da SEMAD se deu pela disponibilidade de dados para os períodos coincidentes com os levantamentos de campo, neste sentido das cinco estações operadas em Belo Horizonte três delas estiveram aptas a serem utilizadas, PUC São Gabriel, PUC Barreiro e Contorno. Estas estações são bastante robustas e com alto grau de confiabilidade dos dados. Os dados são gerados de hora em hora, durante 24 horas por dia, 365 dias por ano. Possuem informações de material particulado  $PM_{10}$  e vários outros gases. As estações utilizadas são as mesmas homologadas pela EPA, providas de cabines climatizadas onde são instalados analisadores de gases, sensores meteorológicos e sistemas de aquisição e transmissão dos dados. De acordo as informações do órgão ambiental (SEMAD) os poluentes monitorados são óxidos de nitrogênio, ozônio, monóxido de carbono, dióxido de enxofre, partículas respiráveis e partículas inaláveis, além de parâmetros meteorológicos. Os dados de todas as estações da rede são transmitidos em tempo real a três centrais de aquisição de dados via internet ao Centro Supervisório do NQA/SEMAD.

Os dados de monitoramento da qualidade de ar são disponibilizados em arquivo no formato Excel, após validação realizada pela equipe técnica do órgão, os quais encontram-se separados por municípios e, dentro destes, por estação. Os dados filtrados do banco de dados histórico das estações seguiram fielmente os mesmos dias das coletas de campo do período de

inverno (seca) de 01/08/22 a 10/08/22 - 15/09/22 a 21/09/22 e para a estação chuvosa (verão) o período de 30/10 a 10/11/23<sup>25</sup>.

## 4.5. Experimentos de Campo e Equipamentos

### 4.5.1 Metodologia de coleta utilizada

O campo de pesquisa escolhido para o trabalho foram as principais vias de circulação do município de Belo Horizonte (MG). Elas foram escolhidas em função de suas características relacionadas à circulação de veículos (fontes emissoras), à topografia, ao uso e à ocupação do solo, ao adensamento urbano, à presença de cânions urbanos e às grandes extensões usadas como importantes corredores viários da capital que fazem conexões sobre o sítio urbano e poderiam explicar de certa forma como o fenômeno da poluição urbana se reflete sobre os bairros e regiões da capital.

Como já mencionado anteriormente a definição das vias se deram em função de algumas premissas básicas como representatividade espacial no município de Belo Horizonte; presença de fluxo de veículo elevado; diferenças topográficas consideráveis entre o seu transecto; fluxo de veículo relativamente homogêneo ao longo de toda a via; uso e ocupação do solo diversificado ao longo do transecto; e logística favorável para execução do trabalho.

Os monitoramentos de campo realizados neste estudo seguiram as recomendações técnicas do Guia Técnico para Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar (MMA, 2019). Para o Guia Técnico, tem-se as seguintes premissas básicas e conceitos que foram levados em consideração para realização das escolhas dos pontos a serem monitorados:

A classificação da representatividade espacial depende da localização da estação, considerando-se: poluente de interesse, proximidade das fontes de emissão, intensidade das emissões, condições de topografia, relevo e transporte dos poluentes. Depende também da posição da sonda de amostragem em relação à altura de captação e à proximidade de obstáculos (edificações, árvores etc.). A localização das estações em relação às fontes de emissão mais relevantes deve ser verificada. Para as fontes móveis destaca-se a relação com vias de grande tráfego, por serem os veículos importantes fontes de emissão e também por emitirem poluentes na zona respiratória. Ainda na ótica das emissões das fontes móveis, é recomendável observar não só a influência da topografia e meteorologia locais, mas também as características e a disposição das edificações (geometria urbana) para definir o melhor posicionamento de uma estação.

---

<sup>25</sup> Importante salientar que o mês de dezembro e janeiro, que são tipicamente mais chuvosos, representariam o verão de forma mais proeminentemente, mas inicialmente foi descartado em função da dinâmica do fluxo de veículos em Belo Horizonte que fica completamente alterado nesta época, primeiramente, pelas alta circulação das festividades de final de ano, e, posteriormente, pela baixa substancial, em função das férias escolares.

Os resultados do monitoramento efetuado devem representar as concentrações do poluente de interesse em uma escala espacial compatível com os objetivos estabelecidos. O conceito de escala espacial de representatividade diz respeito à extensão da parcela de ar no entorno da estação de monitoramento que apresenta concentrações relativamente uniformes e similares às concentrações medidas na estação (MMA, 2019).

Para o MMA (2019), dependendo dos objetivos, as escalas de representatividade mais apropriadas para as estações de monitoramento podem assim serem definidas (QUADRO 8).

**Quadro 8:** Escala de Monitoramento da qualidade do ar

Microescala	Representatividade espacial de áreas com dimensão de até 100 metros;
Mesoescala (ou escala média)	Representatividade espacial de blocos de áreas urbanas, abrangendo dimensões entre 100 e 500 metros;
Escala de bairro	Representatividade espacial de áreas de bairros urbanos com atividade uniforme e dimensões entre 500 e 4.000 metros;
Escala urbana	Representatividade espacial de cidades ou regiões metropolitanas, da ordem de 4 a 50 quilômetros.

Fonte: MMA, 2019.

Segundo Guia Técnico para Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar (MMA, 2019), os principais aspectos a serem observados na construção e na alocação de estações de monitoramento são:

- Cobertura do solo ao redor da estação;
- Altura da sonda de amostragem;
- Distância de obstáculos;
- Distância de árvores.

A consideração da distância da sonda a obstáculos e a árvores (linha de gotejamento da árvore) visa permitir a livre circulação do ar ao redor do ponto de amostragem (MMA, 2019). Outro elemento importante a ser considerado é cobertura do solo ao redor da estação para o

monitoramento de material particulado, pois ocorre muita ressuspensão de terra em solos descobertos, o que pode ocasionar resultados falsos das medições (MMA, 2019).

A altura da sonda de amostragem também é um importante aspecto técnico para a instalação de uma estação de qualidade do ar e varia de acordo com o poluente a ser monitorado, conforme indicado no TAB. 4. As sondas com alturas muito baixas ou muito altas podem interferir nos resultados das medições a que o monitoramento se propõe. Sondagens com altura diferente das descritas podem eventualmente ser utilizadas para fins específicos, desde que os objetivos do monitoramento sejam devidamente documentados (MMA, 2019).

Por vezes, não é possível atender, ao mesmo tempo, a todos os critérios técnicos na definição da localização das estações de qualidade do ar e isso não deve ser um empecilho para que o monitoramento ocorra. Para esses casos, é importante destacar as opções efetuadas e as respectivas considerações adotadas pela pesquisa (MMA, 2019).

Para o trabalho em específico com medições essencialmente urbanas com presença de cânions urbanos e de grandes edificações, não é possível o atendimento de se evitar as barreiras físicas com as distâncias propostas para obstáculos edificados. Nesses casos, o próprio Guia do MMA faz a menção dessa exceção para trabalhos em sítios urbanos.

**Tabela 4:** Indicações técnicas para a microlocalização de estações de monitoramento

Poluente	Escala de representatividade	Altura dos amostrador (m)	Distância de árvores	Obstáculos
CO	Micro	2 a 3,5		
	Demais escalas	2 a 5		
SO <sub>2</sub>				O dobro da altura do obstáculo
O <sub>3</sub>			>10	
NO <sub>2</sub>	Todas as escalas	2 a 5		
MP <sub>10</sub> e MP <sub>2,5</sub>				

Fonte: Adaptado MMA, 2019, p. 22.

#### 4.5.2 Informações técnicas sobre a coleta de campo

Em consonância com as diretrizes do Guia Técnico para Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar (MMA, 2019), os pontos de monitoramento selecionados atenderam às especificações indicadas no Guia com exceção do distanciamento de edificações, justamente por ser tratar de um trabalho essencialmente de sítio urbano. A estrutura a seguir (FIG. 29) mostra o aparato padrão que foi montado para o monitoramento da qualidade do ar nas vias de circulação.

**Figura 29:** Padrão adotado para a microlocalização da estação de qualidade do ar em campo



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os quadros abaixo (QUADRO 9 e 10) apresentam as vias de circulação que foram contempladas na primeira campanha, período seco, realizada no período de agosto e setembro de 2022 e segunda campanha, estação chuvosa, realizada em outubro e novembro de 2023.

Os horários de coleta não tiveram como premissa a condição mais extrema de circulação das vias, ou seja, não foram privilegiados apenas os horários de pico ou *rush*, justamente devido aos objetivos desta pesquisa cuja finalidade não é de um estudo para fins epidemiológicos, no sentido de avaliar as repercussões máximas de concentração de poluente em relação à saúde humana, mas sim de viés climatológico e geográfico. A possibilidade da circulação de veículos em áreas em que a fisiografia urbana e os fatores geocológicos sejam favoráveis à sustentação de “bolsões de poluição”, “bacias atmosféricas” ou “bacias aéreas”. Diante do exposto, os horários foram amplamente estendidos para o período da manhã e período da noite.

**Quadro 9:** Lista das vias onde foram realizados os monitoramentos da qualidade do ar – período seco (inverno)

Vias de circulação	Data da coleta	Horário de coleta
Av. Amazonas	01/08/2022	8:30 às 13:00
Av. Nossa Sra. do Carmo	02/08/2022	18:30 às 21:00
Av. Silva Lobo/ Barão Homem de Melo (diurno)	03/08/2022	8:30 às 10:00
Av. Silva Lobo/ Barão Homem de Melo (noturno)	03/08/2022	19:30 às 20:30
Rua Padre Eustáquio	05/08/2022	19:30 às 20:30
Av. Presidente Antônio Carlos	08/08/2022	19:00 às 20:30
Anel Rodoviário	20/09/2022	08:30 às 10:00

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Quadro 10:** Lista das vias onde foram realizados os monitoramentos da qualidade do ar – período chuvoso (verão)

Vias de circulação	Data da coleta	Horário de coleta
Av. Amazonas	30/10/2023	8:30 às 13:00
Av. Nossa Sra. do Carmo	31/10/2023	18:30 às 21:00
Av. Silva Lobo/ Barão Homem de Melo (diurno)	01/11/2023	8:30 às 10:00
Av. Silva Lobo/ Barão Homem de Melo (noturno)	01/11/2023	19:30 às 20:30
Rua Padre Eustáquio	10/11/2023	19:30 às 20:30
Av. Presidente Antônio Carlos	06/11/2023	19:00 às 20:30
Anel Rodoviário	07/11/2023	08:30 às 10:00

Fonte: Elaborado pelo autor.

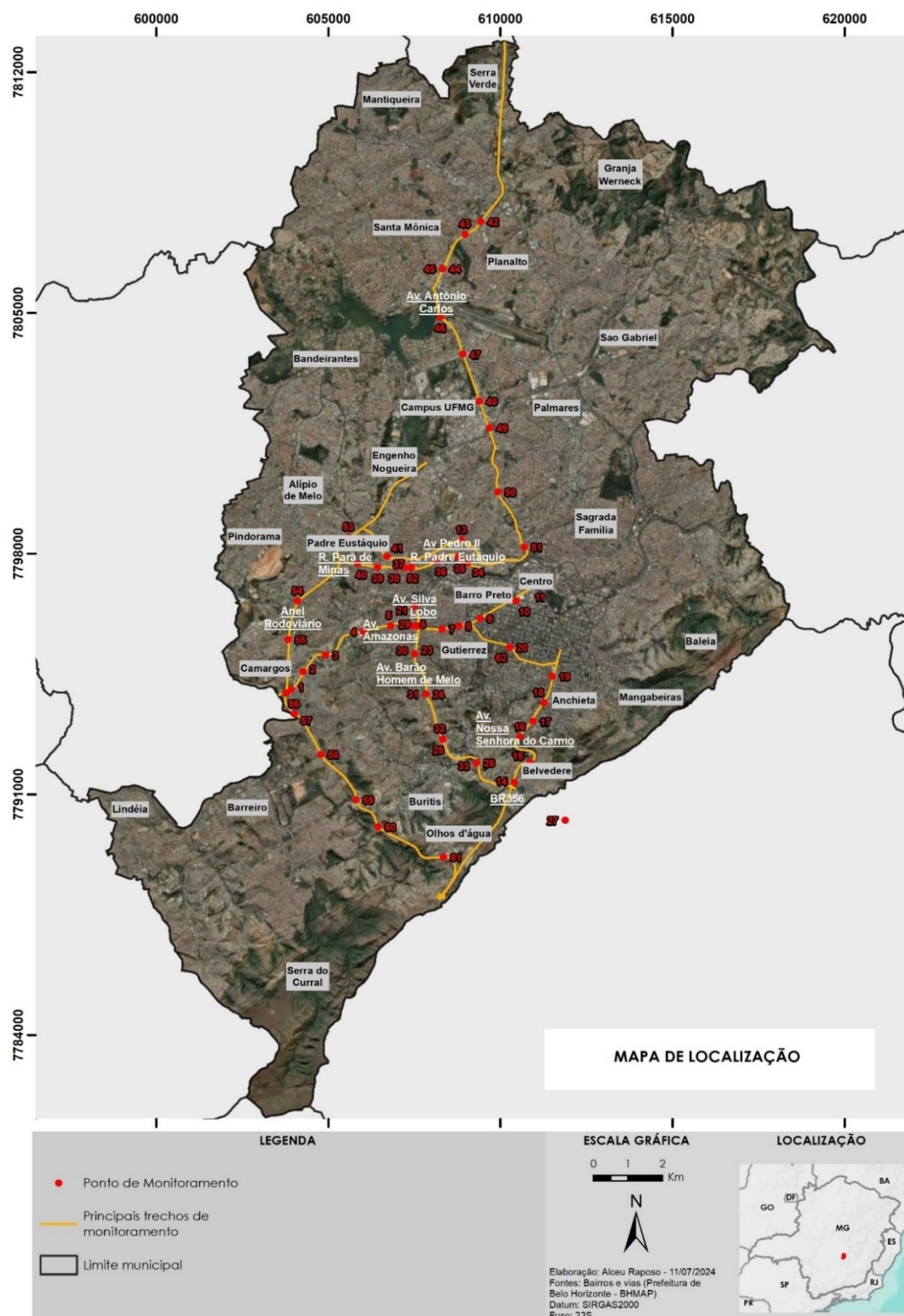
Para cada via de circulação monitorada foi realizado uma série de registros de forma não equivalente (número de pontos monitorados), dado aos objetivos propostos pelo estudo que não tem como elementos principais uma simples análise comparativa das vias mais ou menos “poluídas”. Assim, a quantidade de pontos monitorados em cada via de circulação não é a mesma (equivalentes), dada às condições de cada uma e a suas particularidades que podem ser assim destacadas, tais como: tamanho de cada via (km), diferenciação de uso e de ocupação, circulação diferenciada do número de veículos ao longo da via, topografia local, acesso para realização do monitoramento e condições seguras para realização do trabalho de campo.

Como proposta metodológica, foi determinado, ao final de cada via monitorada, uma espécie de “ponto controle”, cujo objetivo era comparar os resultados obtidos ao longo da via de circulação monitorada com um ponto distante geograficamente, topograficamente e com circulação de veículos diferenciada (diferentes emissões). O intuito é entender se as condições de concentração de poluente verificada naquela via tinham as mesmas ou aproximadas magnitudes de concentrações do ponto controle ou não. Esta técnica, em princípio, ajuda a

entender se há uma clara diferenciação de concentração de poluente entre as vias (escala de microclima) ou se grande parte do sítio urbano monitorado está sobre as mesmas concentrações, influenciadas pelas condições climáticas do clima local ou mesoclima (Monteiro, 1976).

Os mapas (FIG. 30 e 31) e as TAB. 5 a 11 apresentam as vias de circulação nas quais foram realizadas as campanhas de campo e os pontos de monitoramento realizado com suas respectivas coordenadas.

Figura 30: Mapa com os pontos de monitoramento realizados com a estação móvel



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 5:** Pontos monitorados na Av. Amazonas

8:30 às 13:00 - 01/08/2022		
Ponto	Coordenadas	
1	-19 94 72,59	-44 00 68,87
2	-19 94 72,54	-44 00 31,57
3	-19 93 82,06	-43 99 74,32
4	-19 93 18,87	-43 98 69,91
5	-19 93 03,92	-43 97 94,35
6	-19 93 03,77	-43 97 29,95
7	-19 93 11,95	-43 96 51,11
8	-19 93 03,49	-43 96 04,48
9	-19 92 83,32	-43 95 46,16
10	-19 92 36,52	-43 94 46,50
11	-19 91 97,32	-43 93 95,27
12	-19 91 74,36	-43 93 59,53
13 - Ponto controle: Pedro II	-19 90 77,32	-43 95 98,60

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Tabela 6:** Pontos monitorados na Avenida Nossa Senhora do Carmo

18:30 às 21:00 - 02/08/2022		
Ponto	Coordenadas	
14	-19 97 13,62	-43 94 47,95
15	-19 96 60,02	-43 94 04,75
16	-19 95 93,96	-43 94 33,60
17	-19 95 52,24	-43 93 97,74
18	-19 95 04,09	-43 93 66,87
19	-19 94 33,93	-43 93 45,29
20- Ponto controle: Av. Contorno	-19 93 58,60	-43 94 64,11

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Tabela 7:** Pontos monitorados na Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo  
8:30 às 10:00 - 03/08/2022

Ponto	Coordenadas	
21	-19 92 52,84	-43 97 28,57
22	-19 93 03,96	-43 97 19,75
23	-19 93 77,00	-43 97 26,54
24	-19 94 82,74	-43 96 94,79
25	-19 96 00,67	-43 96 48,14
26	-19 96 62,79	-43 95 53,11
27- Ponto controle: Nova Lima	-19 98 12,14	-43 93 06,56

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 8:** Pontos monitorados na Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo  
19:30 às 20:30 - 03/08/2022

Ponto	Coordenadas	
28	-19 92 52,84	-43 97 28,57
29	-19 93 03,96	-43 97 19,75
30	-19 93 77,00	-43 97 26,54
31	-19 94 82,74	-43 96 94,79
32	-19 96 00,67	-43 96 48,14
33	-19 96 62,79	-43 95 53,11
27- Ponto controle: Nova Lima	-19 98 12,14	-43 93 06,56

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 9:** Pontos monitorados na Rua Padre Eustáquio  
19:30 às 20:30 - 05/08/2022

Ponto	Coordenadas	
34	-19 91 37,94	-43 95 81,43
35	-19 91 22,71	-43 96 07,92
36	-19 91 31,82	-43 96 66,27
37	-19 91 50,71	-43 97 37,88
38	-19 91 49,66	-43 97 79,90
39	-19 91 50,11	-43 98 32,04
40	-19 91 40,71	-43 98 87,12
41-Ponto controle: Pedro II	-19 91 21,85	-43 98 06,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 10:** Pontos monitorados na Av. Presidente Antônio Carlos.

19:00 às 20:30 - 08/08/2022		
Ponto	Coordenadas	
42	-19 82 40,27	-43 95 51,44
43	-19 82 73,62	-43 95 93,88
44	-19 83 64,44	-43 96 56,06
45	-19 83 64,38	-43 96 56,04
46	-19 84 91,64	-43 96 61,58
47	-19 85 89,07	-43 95 98,52
48	-19 87 12,30	-43 95 51,81
49	-19 87 81,54	-43 95 22,81
50	-19 89 50,13	-43 94 98,50
51	-19 90 94,69	-43 94 25,02
52- Ponto controle: Padre Eustáquio	-19 91 50,53	-43 97 56,74

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Tabela 11:** Pontos monitorados do Anel Rodoviário

08:30 às 10:00 - 20/09/2022		
Ponto	Coordenadas	
53	-19,907187	-43,991218
54	-19,924016	-44,00533
55	-19,934166	-44,007861
56	-19,91504	-44,008102
57	-19,953675	-44,005982
58	-19,964281	-43,998582
59	-19,976178	-43,988742
60	-19,983240	-43,982571
61	-19,991140	-43,964348
20- Ponto controle: Av. Contorno	-19 93 58,60	-43 94 64,11

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Quanto às estações fixas de qualidade do ar, os dados de localização com suas respectivas coordenadas foram retirados do site da SEMAD, sendo as três<sup>26</sup> estações utilizadas conforme dados a seguir (TAB.12).

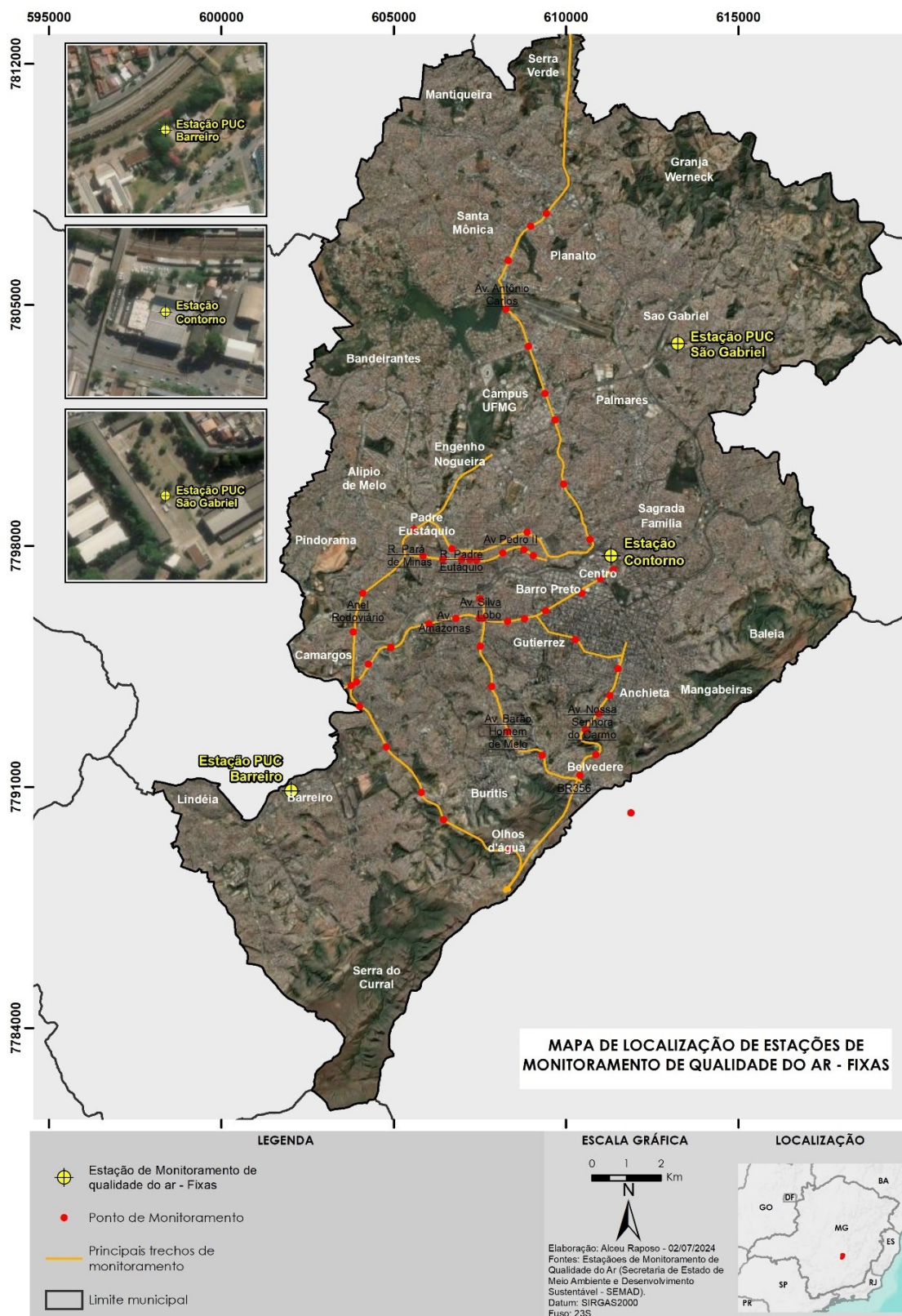
<sup>26</sup> A escolha de três estações das cinco operadas, atualmente, pela SEMAD foi em função dos dados históricos disponíveis para PM<sub>10</sub> no período desejado. Isso porque as demais estações tinham falhas no banco de dados que inviabilizaram sua utilização.

**Tabela 12:** Estações Fixas de Qualidade do Ar  
01/08/22 a 10/08/22 - 15/09/22 a 21/09/22 - 30/10 a 10/11/23.

Estações	Coordenadas	
Contorno	-19.913725	-43.936549
PUC São Gabriel	-19.857921	-43.918480
PUC Barreiro	-19.975967	-44.024850

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Figura 31: Mapa de localização das estações fixas de qualidade do ar em Belo Horizonte



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.5.3 Organização e tratamento estatístico dos dados

Os dados coletados são armazenados diretamente no sistema no *desktop DustTrak DRX* e, posteriormente, exportados para o Excel. Ao importar os dados para o Excel, é realizada a conversão para o sistema brasileiro conforme o CONAMA 506 de 2024, cujas leituras são realizadas em microgramas. Dessa forma, o banco de dados foi estruturado de tal forma que pudesse fazer a conversão automática de miligramas (mg) para microgramas ( $\mu\text{g}$ ).

O tempo de duração de cada monitoramento foi padronizado em 5 minutos, sendo configurado o sistema operacional da *DustTrak DRX* para realização da concentração média desse período, tendo potencialmente a leitura de cerca de 300 coletas. O sistema ainda permite o registro e o armazenamento do valor de máxima concentração e o de mínima concentração do período. Contudo, foram utilizadas as médias aritméticas automáticas do sistema conforme descrição abaixo.

$$\textit{Capacidade do sistema de 1 coleta/seg. x 5 min. = 300 coletas potenciais}$$

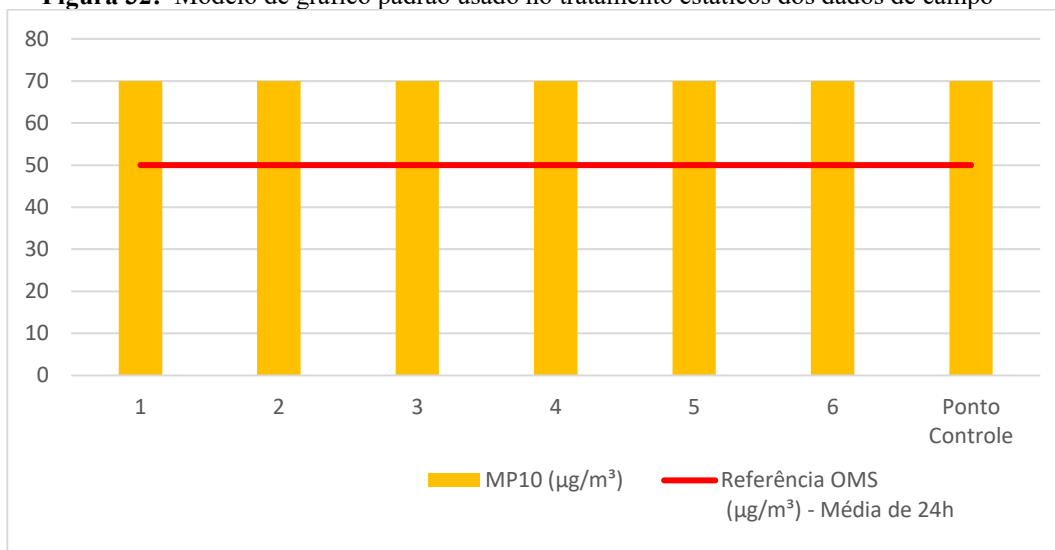
Para cada via de circulação, foi realizada uma tabela dinâmica em Excel (QUADRO 11) estruturada da seguinte forma: o cabeçalho traz o nome da via monitorada seguida da data de coleta e horário (início e término do campo), a primeira coluna enumera cardinalmente os pontos monitorados em campo, a segunda coluna traz as concentrações de  $\text{MP}_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) monitoradas em campo e, por fim, a terceira coluna apresenta a concentração de referência da Resolução Conama 506/2024 para aquele poluente.

**Quadro 11:** Estruturação e organização dos dados de coleta de campo

Nome da via de circulação		
Horário e data de coleta		
Ponto	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	CONAMA 506/2024
1	Concentração medida em campo	Concentração de referência
2	Concentração medida em campo	Concentração de referência
3	Concentração medida em campo	Concentração de referência
4	Concentração medida em campo	Concentração de referência
5	Concentração medida em campo	Concentração de referência
6 - Ponto de controle	Concentração medida em campo	Concentração de referência

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Após a estruturação de cada tabela com seus respectivos dados de campo, foram confeccionados os gráficos comparativos entre os dados medidos e os valores de referência da OMS. Os valores medidos receberam como padrão a cor laranja para todos as vias e os valores de referência seguiram como padrão vermelha (FIG.32).

**Figura 32:** Modelo de gráfico padrão usado no tratamento estáticos dos dados de campo

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Para análise estatística mais complementar foi utilizado a correlação de Pearson que avaliou a relação linear entre duas variáveis contínuas. Uma relação é linear quando a mudança em uma variável é associada a uma mudança proporcional na outra variável. O uso da correlação de Pearson se deu em dois momentos distintos, ao investigar a relação entre topografia e concentração de poluentes em cada uma das vias e ao investigar a correlação entre os sistemas atmosféricos atuantes e as concentrações dadas pelas estações fixas.

$$r_{xy} = \frac{\sum z_x z_y}{N}$$

Em que:

“X” é igual à variável número um

“Y” pertence à variável número dois

“ZX” é o desvio padrão da variável um

“ZY” é o desvio padrão da variável dois

“N” é número de dados.

#### **4.6 Procedimentos de Análise de Qualidade e Organização de Dados**

Para a realização desta pesquisa, dado ao seu caráter inovador, foi necessária a realização de importantes procedimentos metodológicos com o objetivo de garantir a qualidade e a organização dos dados coletados em campo. Nesse contexto, foi igualmente importante a criação de procedimentos de validação da qualidade dos dados antes que estes fossem incorporados ao banco de dados.

Para que todos os procedimentos fossem rigorosamente validados, foi elaborado um *checklist* de validação dos dados de campo por meio de um sistema de controle (planilha) na qual somente eram incorporados os dados preenchessem todos requisitos pré-estabelecidos. Caso contrário, o dado era invalidado e uma nova campanha de campo era realizada para cumprir os métodos estabelecidos (QUADRO 12 e 13).

**Quadro 12:** Critérios de validação da qualidade dos dados Primeira Campanha (Inverno)

Campanhas	Data da coleta	Critérios		
		Meteorológico	Condições viária	Observação de campo
Av. Amazonas	01/08/2022	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Nesse período, a avenida estava com trânsito intenso, porém bom e fluindo nos vários sentidos. Não apresentava retenções como comumente correm na Av. Amazonas em qualquer trecho.
Av. Nossa Sra. do Carmo	02/08/2022	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajadas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Nesse período, a avenida estava com trânsito intenso e mais lento na porção mais ao sul (BH <i>Shopping</i> ), porém com trânsito mais livre na porção ao norte (Savassi). Uma pequena obra estruturante da prefeitura em frente ao Supermercado Verdemar pode ter influenciado a qualidade do ar nesse trecho.
Av. Silva Lobo/ Barão Homem de Melo (diurno)	03/08/2022	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Trânsito estava intenso durante o dia na sua porção inicial (próximo à Tereza Cristina) e menos intenso no seu terço final próximo à esquina do Raja Gabaglia.
Av. Silva Lobo/ Barão Homem de Melo (noturno)	03/08/2022	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Trânsito estava intenso à noite na sua porção final (Raja Gabaglia) e menos intenso próximo à Tereza Cristina.

Av. Presidente Antônio Carlos	08/08/2022	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajadas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Trânsito com um fluxo bom sem nenhuma retenção em todos os sentidos da via. Da sua porção inicial a sua porção final o fluxo se mostrou o mesmo.
Anel Rodoviário	20/09/2022	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajadas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Trânsito muito intenso nas proximidades do aeroporto Carlos Prates, com alguns trechos mais livres, porém intenso nos dois sentidos sem retenção.

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Quadro 13:** Critérios de validação da qualidade dos dados – Segunda Campanha (Verão)

Campanhas	Data da coleta	Critérios		
		Meteorológico	Condições viária	Observação de campo
Av. Amazonas	30/10/2023	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajadas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Nesse período, a avenida estava com trânsito pouco intenso para o horário, fluindo nos vários sentidos. Não apresentou nenhuma retenção considerável.
Av. Nossa Sra. do Carmo	06/11/2023	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajadas de vento, granizo, inversão térmica) para	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza.)	Nesse período, a avenida estava com trânsito intenso e mais lento na porção mais ao sul (BH Shopping), porém com trânsito mais livre na porção ao norte (Savassi).

		inviabilizar as coletas de campo.		
Av. Silva Lobo/ Barão Homem de Melo (diurno)	01/11/2023	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajadas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Trânsito estava intenso durante o dia na sua porção inicial (próximo à Tereza Cristina) e menos intenso no seu terço final próximo à esquina do Raja Gabaglia.
Av. Silva Lobo/ Barão Homem de Melo (noturno)	01/11/2023	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajadas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Trânsito estava intenso à noite na sua porção final (Raja Gabaglia) e menos intenso próximo à Tereza Cristina.
Av. Presidente Antônio Carlos	10/11/2023	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajadas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Trânsito com um fluxo tranquilo sem nenhuma retenção em todos os sentidos da via. Geralmente, a via está mais carregada nesse horário em relação à média observada.
Anel Rodoviário	06/11/2023	Sem registros de chuva ou evento anômalo (rajadas de vento, granizo, inversão térmica) para inviabilizar as coletas de campo.	Sem registros de eventos anômalos na via durante a campanha ou por meio das informações fornecidas pela BHTrans (longos trechos de engarrafamento, acidentes graves, manifestações e demais transtornos dessa natureza).	Trânsito muito intenso nas proximidades do aeroporto Carlos Prates. Na Altura do bairro Olhos d'água, existe uma retenção que ocasionou trânsito mais lento na subida para o Rio de Janeiro. Nesse trecho, a qualidade do ar pode ter consequências com essa retenção.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.7 Procedimentos de Tratamento Espacial e Estatístico dos Dados

O tempo de duração de cada monitoramento foi padronizado em 10 minutos, sendo configurado o sistema operacional da *DustTrak DRX* para realização da concentração média desse período, tendo, potencialmente, a leitura de cerca de 600 coletas. O sistema ainda permite o registro e o armazenamento do valor de máxima concentração e o de mínima concentração do período, contudo, foram utilizadas as médias aritméticas automáticas da estação.

Ao todos foram realizados 110 pontos de monitoramento, sendo 55 pontos na primeira campanha (inverno) e 55 pontos na segunda campanha (verão) ao longo de 6 importantes vias de circulação. No total, foram realizadas 18,33 horas de monitoramento da qualidade do ar no município de Belo Horizonte ou 1.100 min. de monitoramento. Conforme já apontado, esse esforço apresenta um resultado bastante considerável em termos de horas de pesquisa com levantamentos de dados diretos, especialmente em pesquisa de dados móveis que até então não haviam sido realizados em Belo Horizonte.

Importante salientar que se optou por utilizar como referência a média de 24 horas da Resolução Conama como comparação dos resultados obtidos em campo, ainda que a média obtida em campo tenha sido de 10 min. A contribuição, nesse sentido, dá-se como referencial da escala de valores a serem observados em campo e não necessariamente uma comparação direta ou *stricto sensu* das referências da OMS para uma exposição humana diária média de 24 horas. Isso porque trata-se em especial de um trabalho geográfico com buscas em objetivos espaciais, com base em referenciais geográficos e climatológicos e não necessariamente epidemiológico.

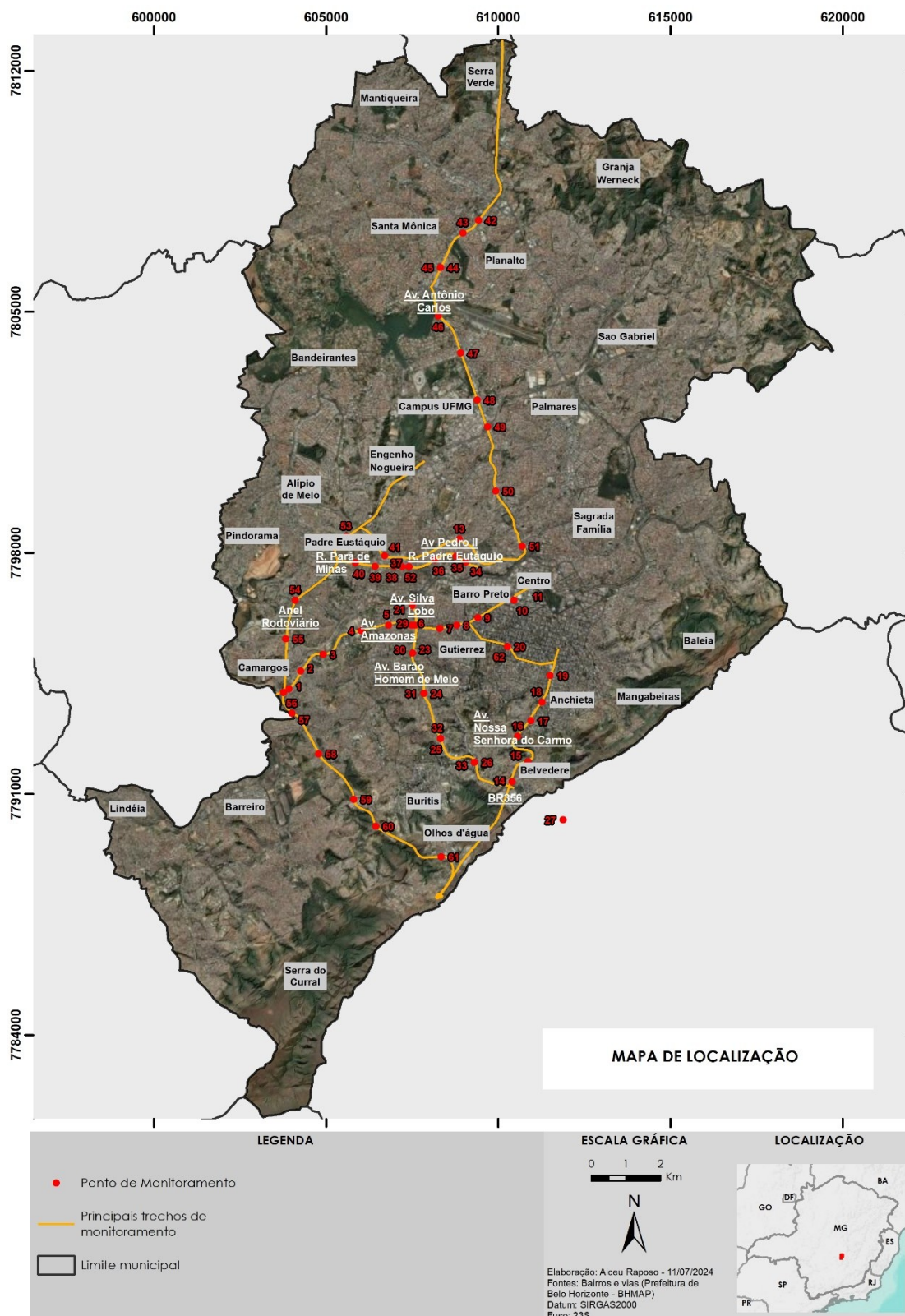
#### 4.8 Definição dos Pontos de Monitoramento sobre As Vias

Inicialmente se faz importante mencionara que com base nos estudos referenciados na bibliografia não existe um número específico de pontos amostrais indicados para coleta das informações sobre cada uma das vias. Este levantamento depende das características e do porte de cada uma das vias e assim, o adensamento necessário para obtenção de dados que posam representar com confiabilidade aquele traçado. De acordo com as suposições teóricas e tentando sempre a máxima aproximação dos objetivos da pesquisa, utilizou-se também como base o mapa de uso do solo e o modelo digital de terreno como referências para a escolha dos pontos amostrais.

Para a definição dos pontos de monitoramento sobre cada uma das vias foi primeiramente necessário a realização de um campo de reconhecimento em detalhe. Após a visita ao longo de cada uma das vias foi possível definir melhor: i) espaçamento médio entre os pontos; ii) representatividade espacial de pontos sobre diferentes níveis topográficos; iii) representatividade espacial de pontos sobre diferentes usos e ocupação do solo; iv) representatividade espacial dos fluxos médios de trânsito sobre a via (retirando os *outliers*); v) logística adequada para instalação dos pontos, evitando locais como: a) área de garagem, b) ponto de ônibus, c) entrada/saída de postos de combustíveis e lava-jatos, d) portarias de escolas, hospitais e comércios, estacionamentos, e) *banners* comerciais, placas de propaganda em solo que funcionem como barreiras, f) obras civis, g) passeios em solo desnudo ou em restauração, h) próximo de escavações ou valas abertas, i) atividades envolvendo pintura, j) de baixo de árvores frondosas, k) oficinas mecânicas/marcenarias/serralherias/tornearias, l) depósitos de material de construção, m) restaurantes contendo fogão a lenha/churrasqueira ou chapas/fritadeiras com exautores, n) locais com caldeirarias; o) sob toldos, marquises, tendas ou coberturas metálicas etc.

Por estes motivos é necessária uma boa base cartográfica e um conhecimento prévio das condicionantes locais que possam interferir nos resultados e deste modo evitar tais locais indesejados para os objetivos propostos. Neste sentido, a decisão sobre a escolha dos pontos amostrais utilizados neste trabalho foi respaldada nos elementos acima citados.

**Figura 33:** Mapa de Localização do Município de Belo Horizonte com destaque para as vias de circulação monitoradas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## **5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

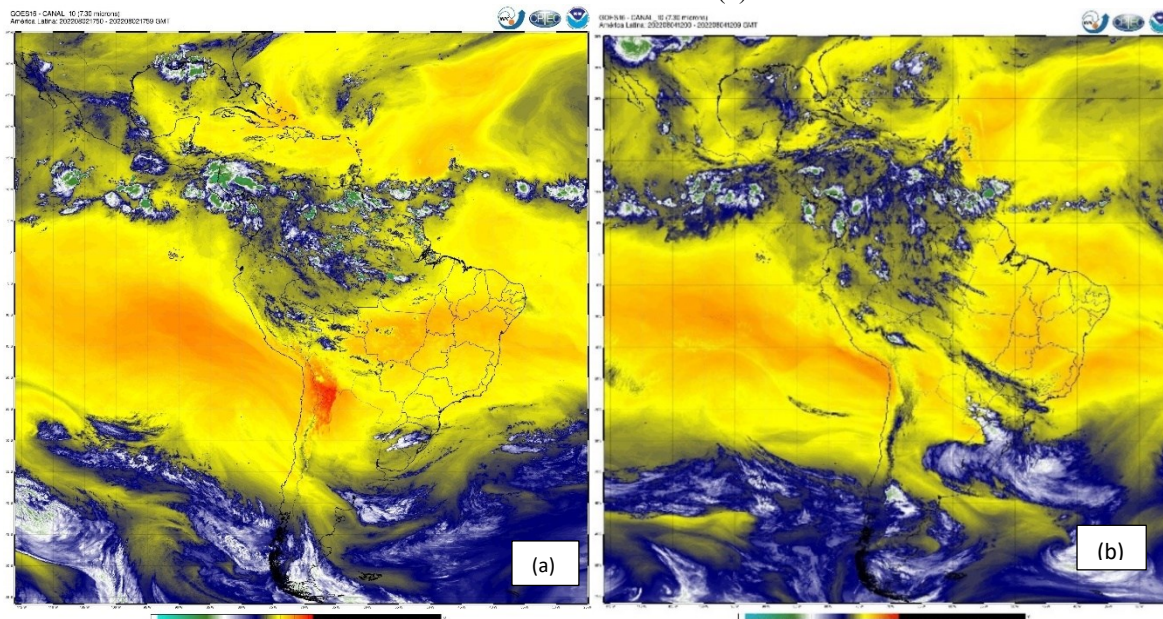
### **5.1. Período Seco (Inverno)**

Durante os levantamentos de campo, conforme metodologia apresentada, foi realizado, concomitantemente, uma análise das condições sinóticas atmosféricas do município de Belo Horizonte entre os dias 01/08/22 a 10/08/22 e, posteriormente, no intervalo dos dias 15/09/22 a 21/09/22, os quais foram marcados por tipos de tempo estáveis com pouca nebulosidade e ventos fracos, situação ideal para realização de experimentos urbanos de interação com a atmosfera mais estável com a qual se buscava para esse momento.

#### ***5.1.1. Condições atmosféricas***

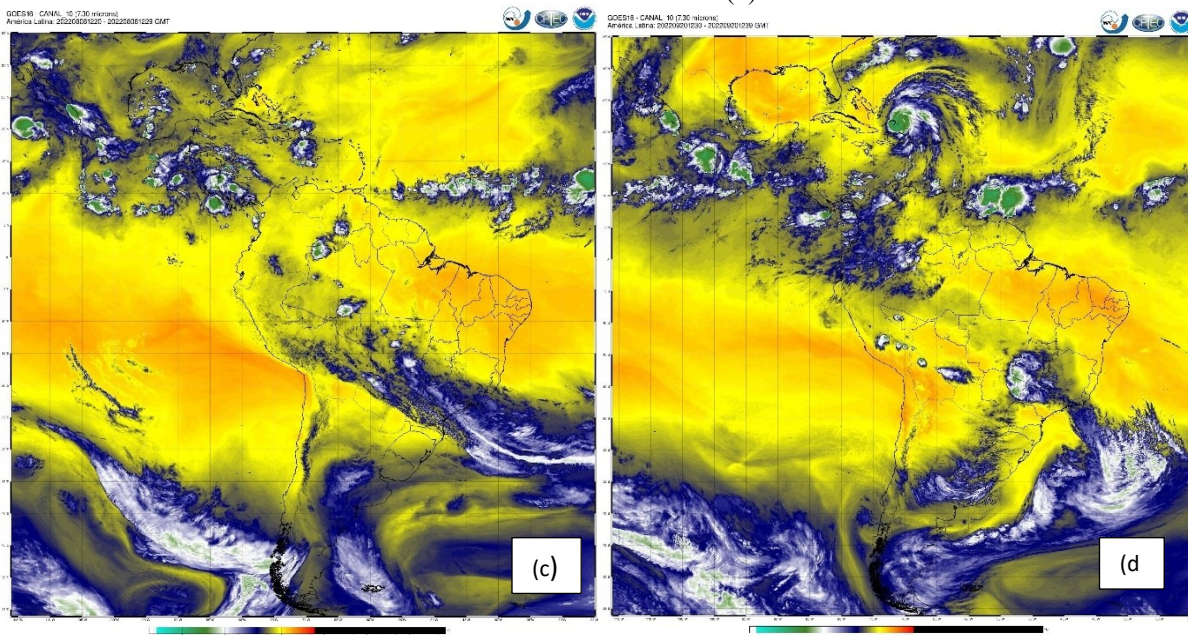
De acordo com os dados observacionais do satélite GOES 16 (FIG. 34 e 35), obtidos junto ao banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), observa-se que o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e o Anticiclone Polar do Atlântico Sul (APAS) foram responsáveis pelas condições meteorológicas, seguido pela atuação do Anticiclone Polar do Atlântico Sul Tropicalizado (APAS<sub>t</sub>) e pelos sistemas frontais (SF) e linhas de instabilidade (LI) – respectivamente.

**Figura 34:** Imagens do satélite meteorológico GOES-16 (Canal 10) IR de 12GMT do dia 02/08/2022 (a) e das 12GMT do dia 04/08/2022 (b).



Fonte: INPE/CPTEC (2024).

**Figura 35:** Imagens do satélite meteorológico GOES-16 (Canal 10) IR de 12GMT do dia 08/08/2022 (c) e das 12GMT do dia 20/09/2023 (d).

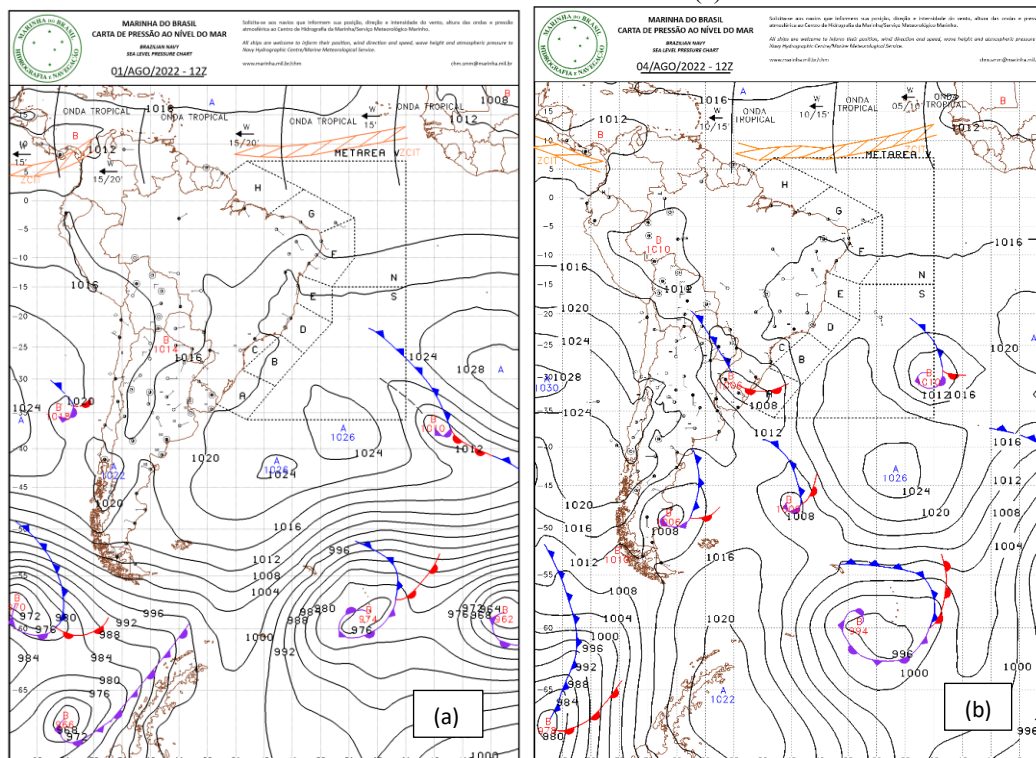


Fonte: INPE/CPTEC (2024).

Em termos gerais, a primeira semana de agosto (01 a 07) foi marcada pela atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que condicionou um sistema de alta pressão em praticamente toda região Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil (FIG. 36 e 37). No domínio do ASAS, verificaram-se condições meteorológicas estáveis com céu claro e poucas nuvens, pressão atmosférica elevada, ventos predominantes do quadrante Leste, umidade relativa do ar mais baixa e estabilidade atmosférica como elemento preponderante. Dadas a

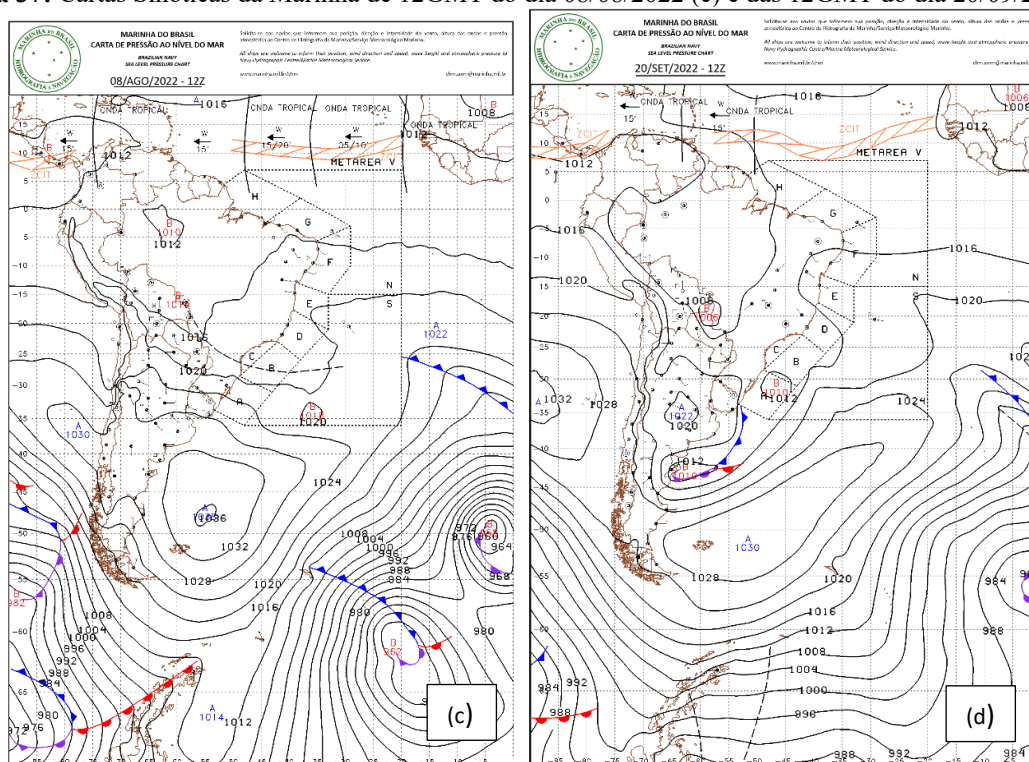
essas características, não foi registrado nenhum tipo de precipitação sob a atuação do Anticiclone Subtropical Atlântico Sul durante esse intervalo de tempo.

**Figura 36:** Cartas Sinóticas da Marinha de 12GMT do dia 02/08/2022 (a) e das 12GMT do dia 04/08/2022 (b).



Fonte: Marinha do Brasil (2024).

**Figura 37:** Cartas Sinóticas da Marinha de 12GMT do dia 08/08/2022 (c) e das 12GMT do dia 20/09/2023 (d).



**Fonte:** Marinha do Brasil (2024).

A atuação do ASAS, nesse período, entre os dias 01 e 07 de agosto, favoreceu elevadas amplitudes térmicas diárias, que atingiram seu ápice no dia 05 com cerca de 20,0°C. A subsidência atmosférica, associada aos ventos fracos em superfície e à baixa umidade do ar, favorecia a ocorrência de inversões térmicas no início da manhã, as quais foram corroboradas pela presença névoa seca na maior parte dos dias nas primeiras horas da manhã.

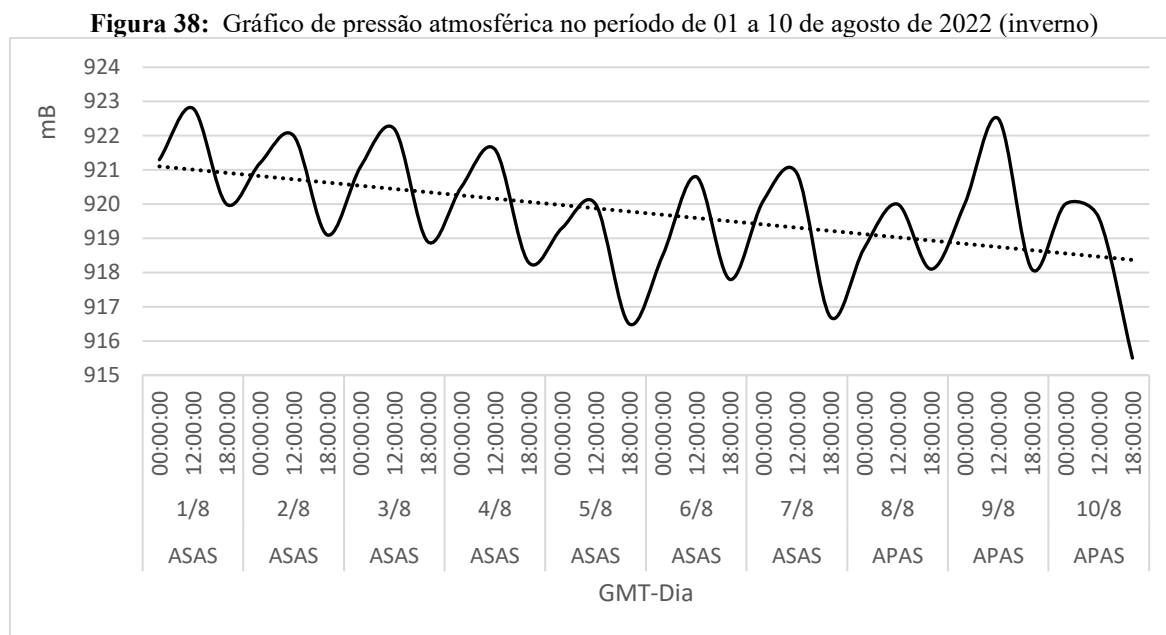
A partir do dia 08 de agosto, verifica-se o recuo do ASAS e a entrada do Anticiclone Polar do Atlântico Sul (APAS), atingindo grande parte do sudeste e centro-oeste do Brasil. Contudo, as condições de tempo observadas permaneceram muito próximas da atuação do ASAS – com uma atmosfera totalmente estável, com pouquíssima nebulosidade, céu limpo durante praticamente todo o dia, umidade relativa do ar elevada nas primeiras horas muito baixa (FIG. 4.4). A única alteração mais proeminente sentida no comportamento da atmosfera durante esse período foi um aumento da velocidade média dos ventos.

Já no dia 20 de setembro, dia da última coleta de dados de campo, as condições atmosféricas se mantiveram praticamente as mesmas dos demais dias de agosto. A umidade relativa do ar baixa, ausência de precipitação, baixa nebulosidade e ventos médios durante todo o dia. O deslocamento de uma Frente Fria (FF) associado a uma forte massa de ar frio, atuando de forma bastante litorânea, a atuação desse sistema sobre o continente fez com que surgissem

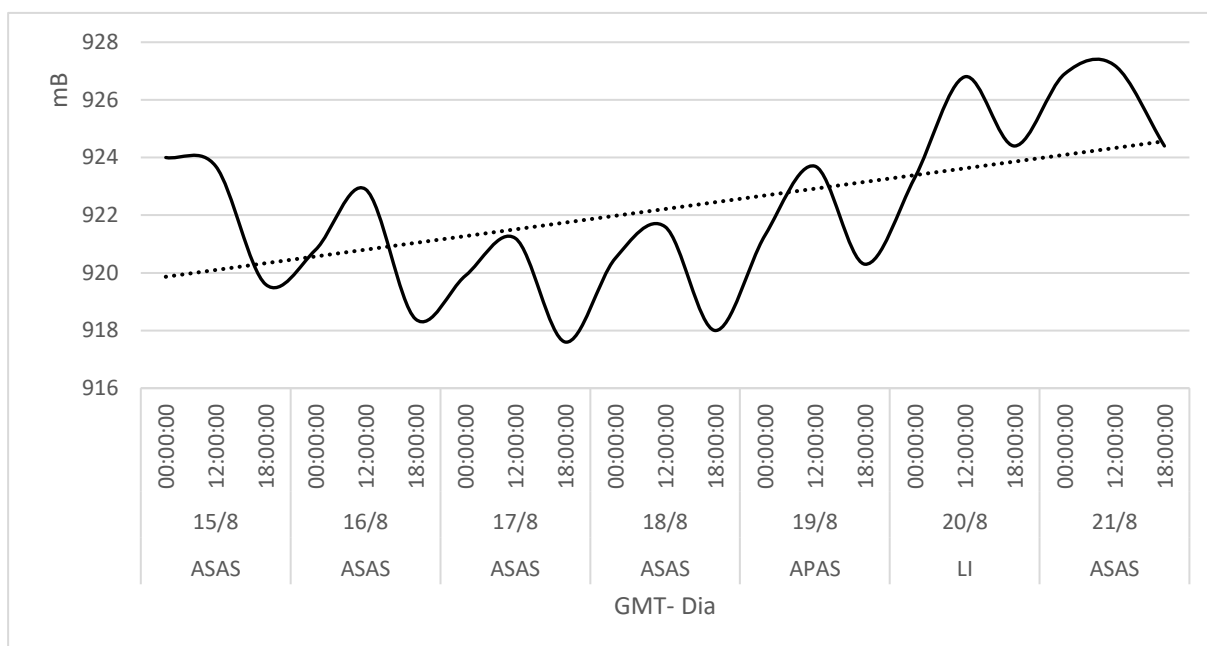
Linhas de Instabilidade (LI) sobre Belo Horizonte, resultando em mudanças nas condições de tempo, mas especialmente na nebulosidade e, conseqüente, na radiação global. O sistema atuante naquele período era uma baixa pressão no Centro-Oeste do Brasil que estava condicionando a formação de instabilidade em toda a região, chegando a influenciar grande parte do território mineiro, porém sem mudanças consideráveis nos parâmetros meteorológicos analisados.

### 5.1.2. *Variação têmporo-espacial dos parâmetros atmosféricos*

Durante os trabalhos de campo, não houve precipitação registrada em Belo Horizonte na campanha de inverno de 2022. A atuação e permanência por alguns dias do ASAS e do APAS, no decorrer dos meses de agosto e setembro, resultou em baixos valores de umidade relativa do ar na capital, com uma média entre os dias 01 e 10 de agosto de 48,8%, chegando a registrar extremos durante alguns dias ao final da tarde (GMT 18:00) de 25% (FIG. 38 e 39). No domínio do ASAS, verificaram-se condições meteorológicas estáveis com céu claro e poucas nuvens.

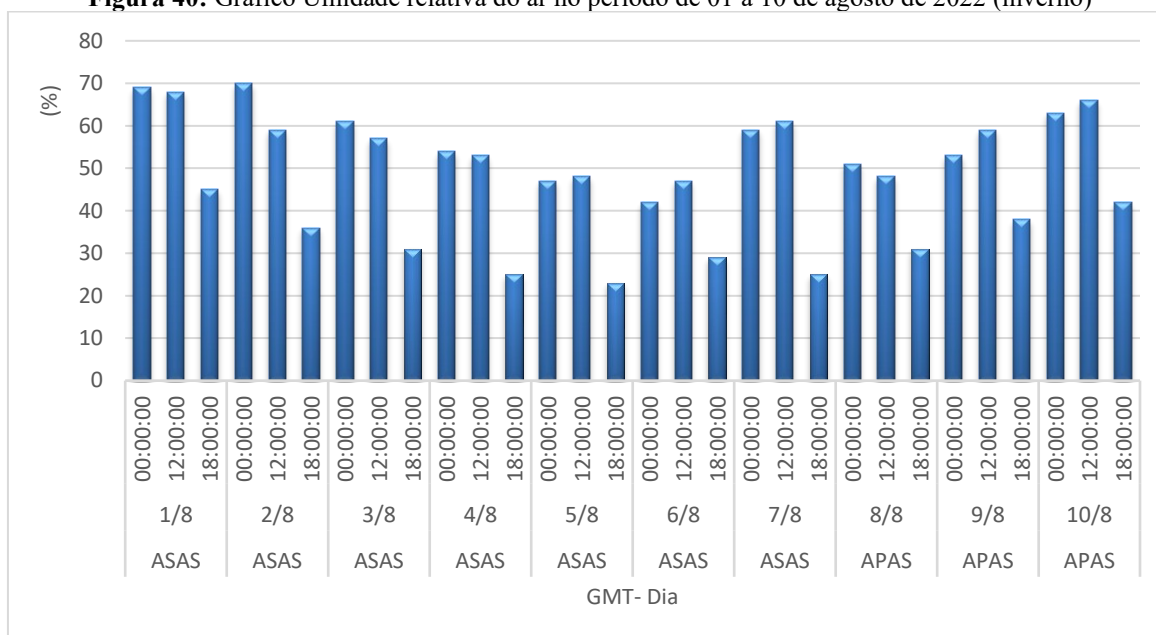


**Fonte:** Elaborado pelo autor.

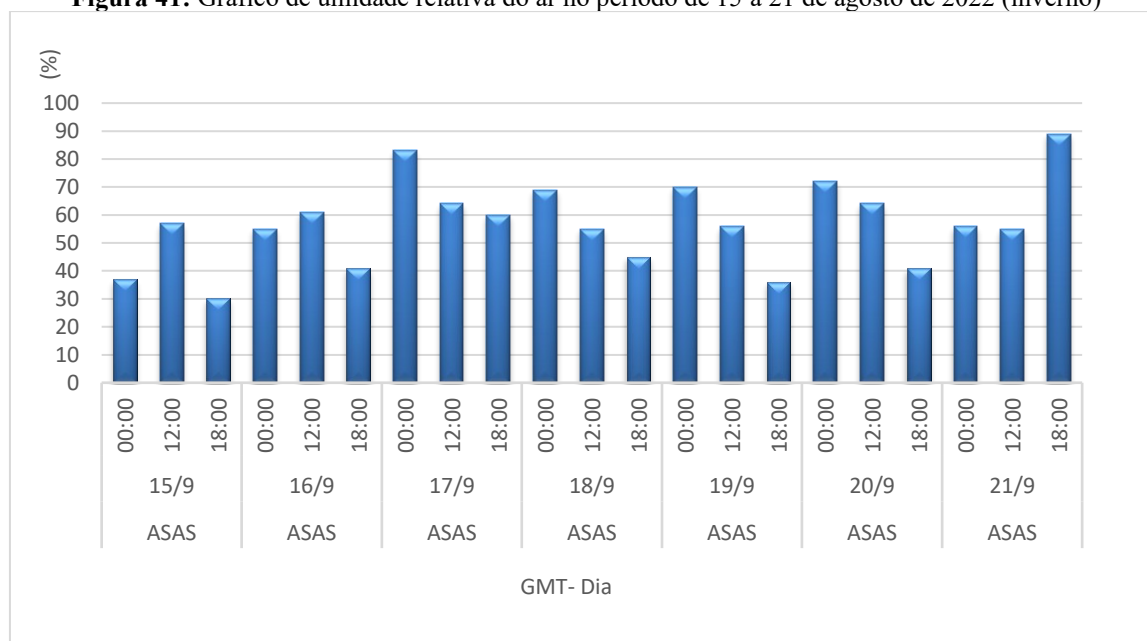
**Figura 39:** Gráfico de pressão atmosférica no período de 15 a 21 de agosto de 2022 (inverno)

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A pressão atmosférica se manteve elevada e constante com uma média de 919,7mb entre os dias 01 e 10 de agosto, com uma ligeira queda durante a entrada da APAS no dia 07 para o dia 08 de agosto. Ao longo da segunda quinzena de setembro, entre os dias 15 e 21, a pressão atmosférica se manteve ainda elevada, com uma média de 918,4 mb (FIG. 40 e 41).

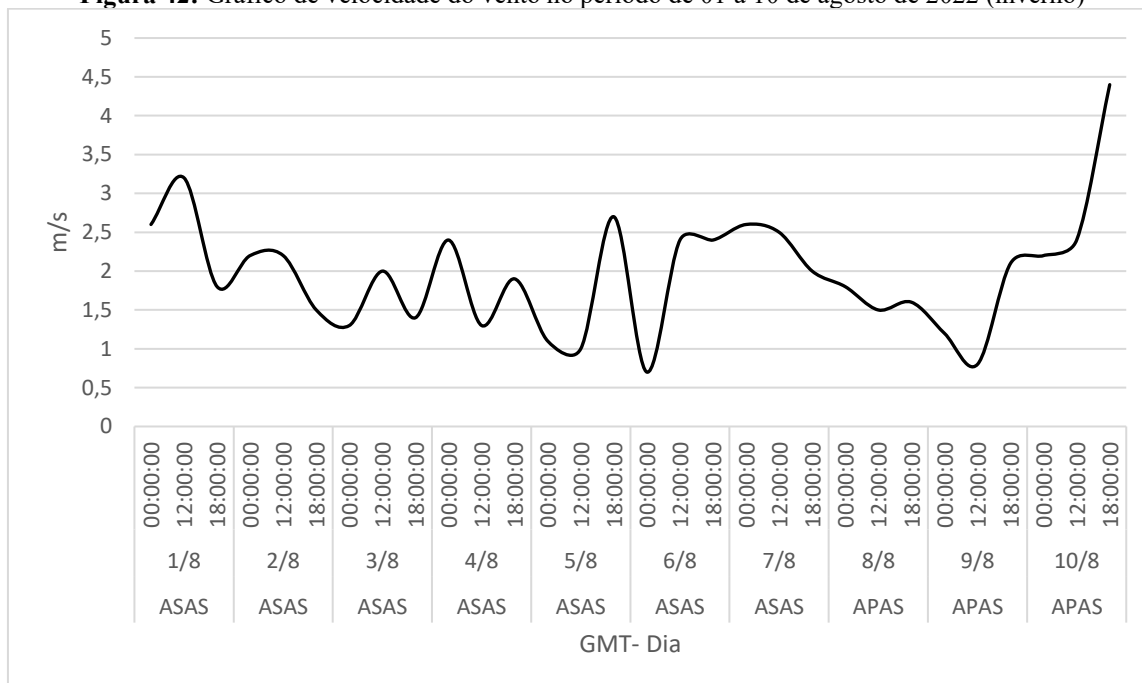
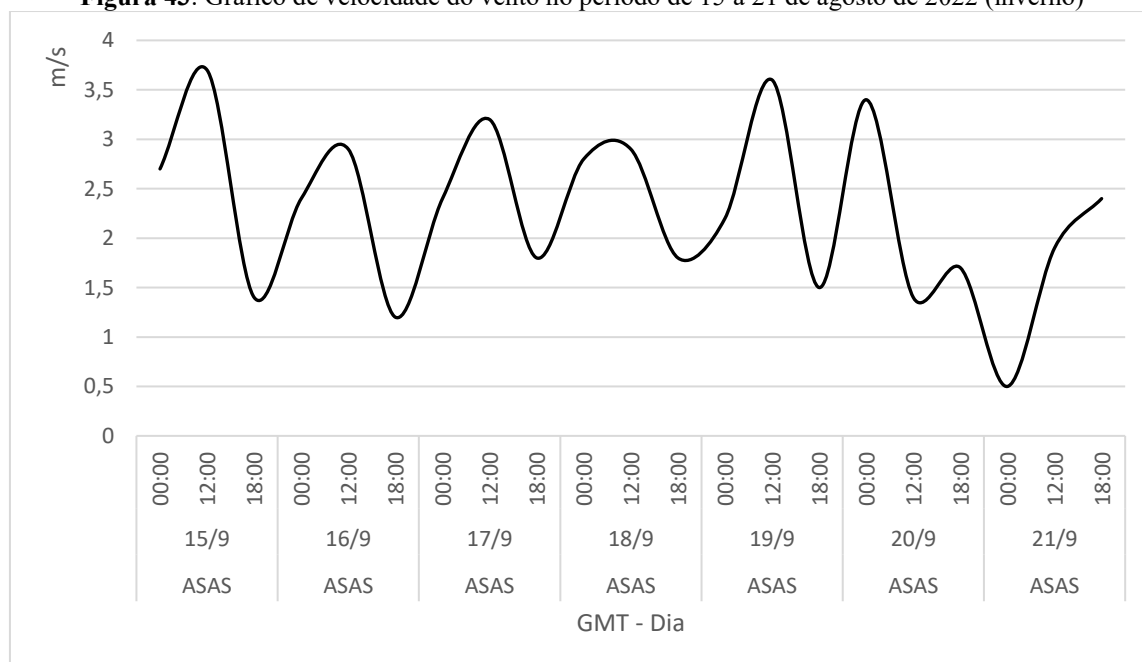
**Figura 40:** Gráfico Umidade relativa do ar no período de 01 a 10 de agosto de 2022 (inverno)

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 41:** Gráfico de umidade relativa do ar no período de 15 a 21 de agosto de 2022 (inverno)

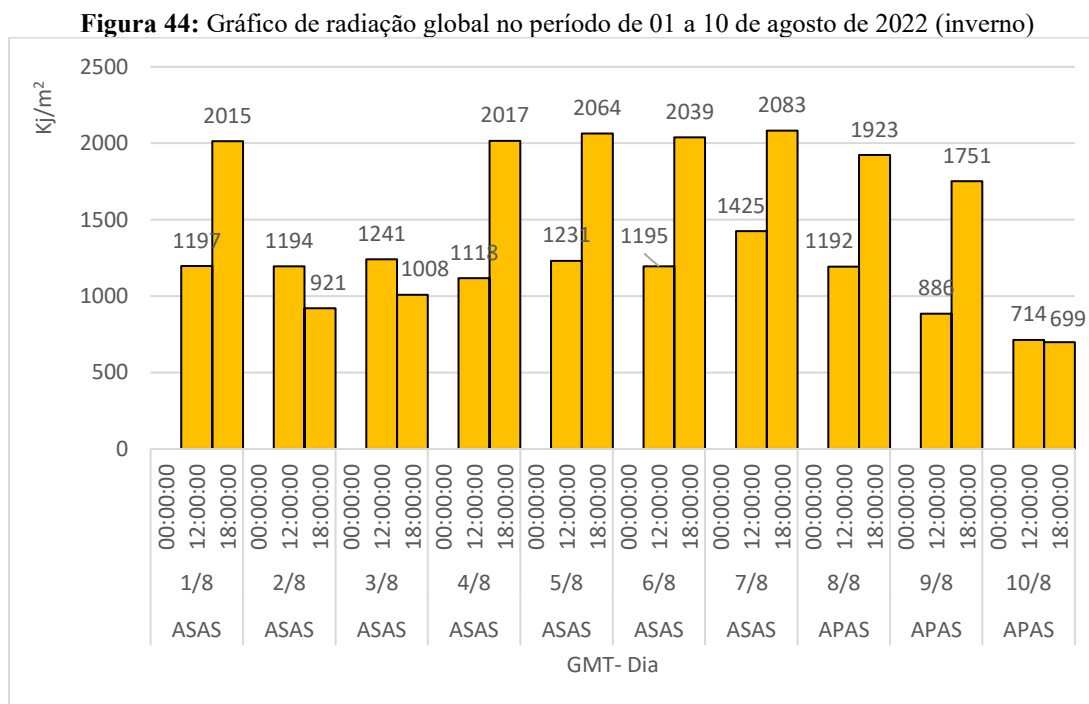
Fonte: Elaborado pelo autor.

Já os ventos se mantiveram predominantes do quadrante leste, alternando ao longo do dia para nordeste e sudeste, com velocidade média baixa de 1,88 m/s entre os dias 01 e 10 a agosto (FIG. 42 e 43). Entre os dias 15 e 21 de setembro, os ventos apresentam uma média um pouco superior ao período de agosto com 2,27 m/s.

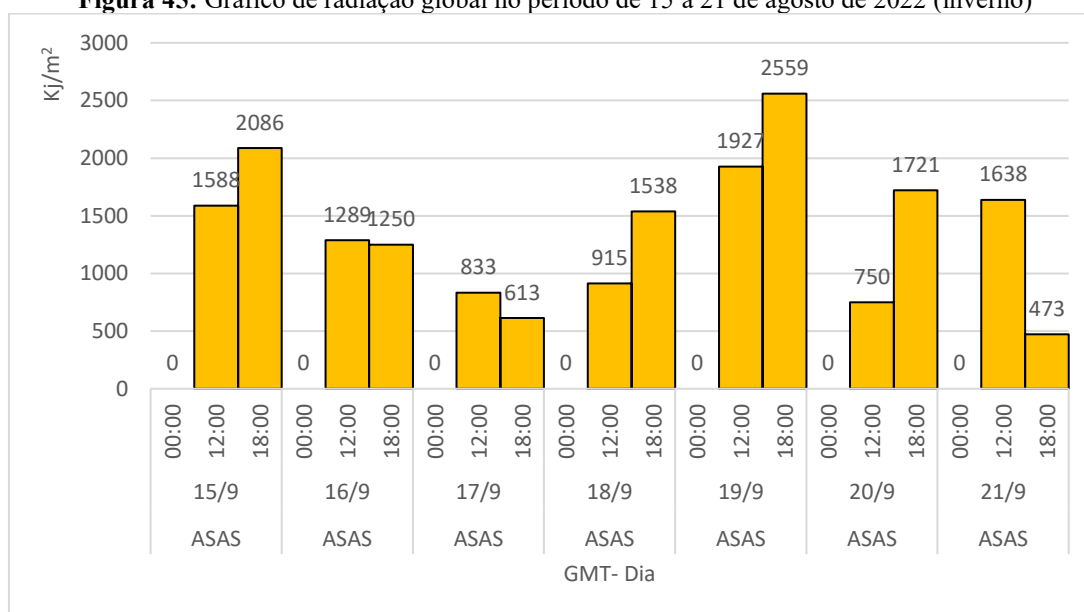
**Figura 42:** Gráfico de velocidade do vento no período de 01 a 10 de agosto de 2022 (inverno)**Fonte:** Elaborado pelo autor.**Figura 43:** Gráfico de velocidade do vento no período de 15 a 21 de agosto de 2022 (inverno)**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A baixa nebulosidade na atuação do ASAS favorecia elevadas amplitudes térmicas diárias, geralmente acima de 10,0°C em média. A temperatura média diária girou em torno dos 22,8°C, máximas de até 30,9°C (08 de agosto) e mínima de 14,4°C (03 de agosto). A radiação global manteve-se elevada durante praticamente todo o intervalo analisado, chegando a valores

diários ao final das tardes de mais de 2000 kj/m<sup>2</sup> (FIG. 44 e 45). Estes valores só foram ser alterados quando da atuação de uma Linha de Instabilidade (LI) que gerou uma maior nebulosidade a partir dia 20 de setembro e, conseqüentemente, uma queda nos valores de radiação global para 750 KJ/m<sup>2</sup> (GMT 12:00).



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 45:** Gráfico de radiação global no período de 15 a 21 de agosto de 2022 (inverno)

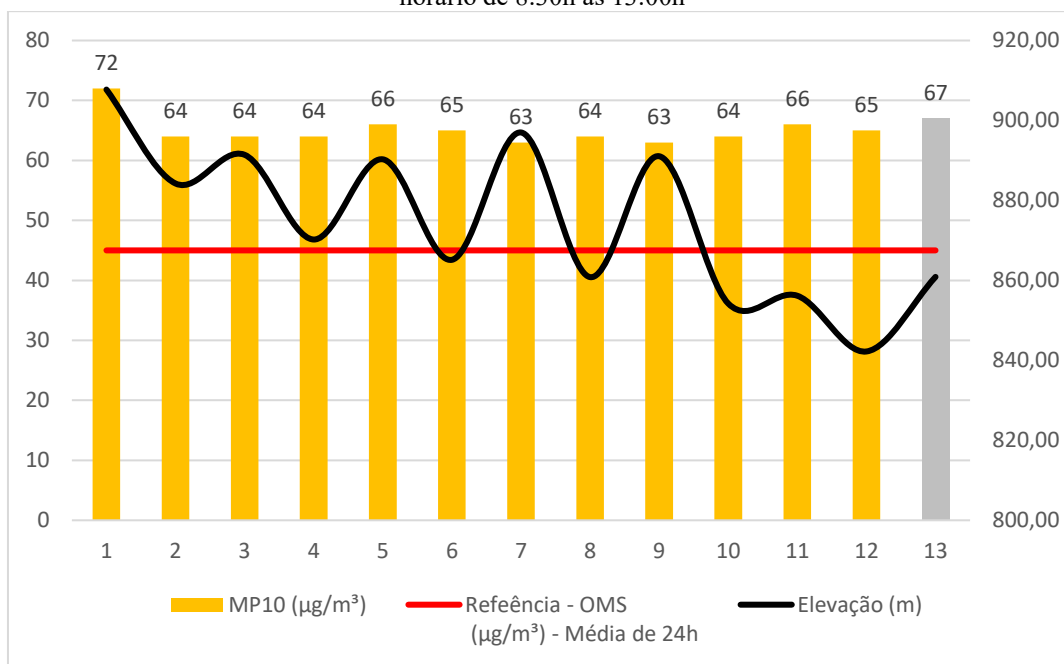
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.3 Resumo estatístico dos dados

#### 5.1.3.1 Estações móveis

Os dados de monitoramento da qualidade do ar para a Av. Amazonas no dia 1 de agosto/2022 apresentaram valores de concentração elevados de  $PM_{10}$  ao longo de todos os pontos de coleta (FIG. 46). A média registrada para toda a via foi de  $65 \mu g/m^3$ , sendo o ponto 1 o máximo registrado com  $72 \mu g/m^3$ , logo no início da via, na divisa com a cidade de Contagem. Esse valor de máxima observada tem forte relação com as atividades industriais daquela região, para além das contribuições veiculares da via. Já os valores de mínima não obtiveram destaque, sendo eles ocorridos nos pontos 7 e 9 com  $63 \mu g/m^3$ .

**Figura 46:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Amazonas - 01 de agosto de 2022- horário de 8:30h às 13:00h



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Com base nos levantamentos estatísticos realizados, a correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$  foi muito baixa, com  $r=0,30$ , indicando que, para aquele período analisado, as concentrações de poluente praticamente não possuíam relação com a topografia da Av. Amazonas. Importante ressaltar que as condições atmosféricas registradas eram de tempo estável e baixa velocidade dos ventos, o que seria propício para a concentração em porções mais baixas do terreno como era o caso dos pontos 6, 8, 10 e 12. Por fim, o ponto de controle (Av. Pedro II) também registrou valores muito semelhantes ( $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) com as concentrações ao longo da Av. Amazonas.

Figura 47: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Amazonas

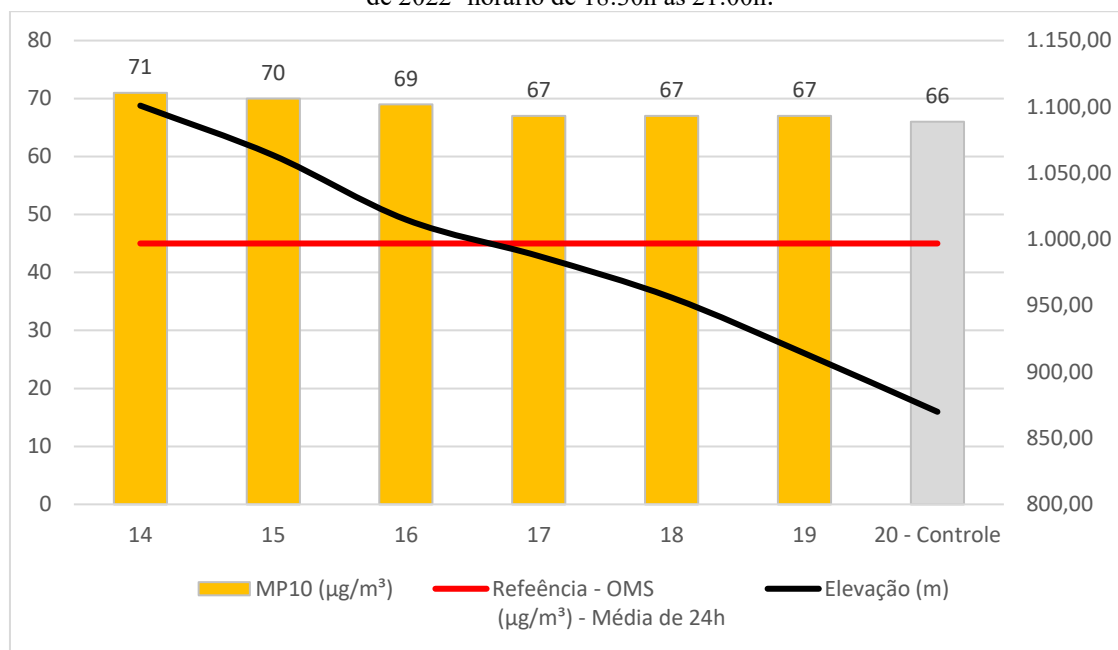


Fonte: Elaborado pelo autor.

O monitoramento da qualidade do ar para a Av. Nossa Senhora do Carmo, no dia 2 de agosto/2022, indicou valores de concentração também elevados de  $PM_{10}$  ao longo de todos os pontos de coleta (FIG. 48). A média registrada para toda a via foi de  $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo o ponto 1 o máximo registrado com  $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , logo no início da via, nas proximidades do BH Shopping. Este valor de máxima foi, de certa forma, surpreendente, uma vez que era de se esperar que o valor de máxima pudesse se dar na porção mais baixa da avenida, em especial, dado à grade movimentação de veículos no cruzamento com a contorno. Já os valores de mínima não obtiveram nenhum destaque, pois se conjecturava que, nas porções mais elevadas com mais circulação do ar atmosférico, pudessem exercer uma “limpeza” no sistema, o que não pode ser registrado nesse monitoramento em específico.

Com base nos levantamentos estatísticos realizados, a correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$  foi alta, com  $r=0,93$ , indicando que, para aquele período analisado, as concentrações de poluente possuíam relação inversa ao esperado, ou seja, quanto menor foi a topografia, menores as concentrações de  $PM_{10}$  registrada, e quanto maior foi a topografia, maior foram as concentrações de poluente. Importante registrar que as condições atmosféricas registradas no dia 02 de agosto eram de tempo estável e baixa velocidade dos ventos, o que seria propício para uma maior concentração nas porções mais baixas do terreno. Por fim, o ponto de controle (Av. Contorno, esquina com Av. Prudente de Moraes) também registrou valores muito semelhantes ( $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) com a concentrações ao longo da Av. Nossa Senhora do Carmo.

**Figura 48:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Nossa Senhora do Carmo – 02 de agosto de 2022- horário de 18:30h às 21:00h.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

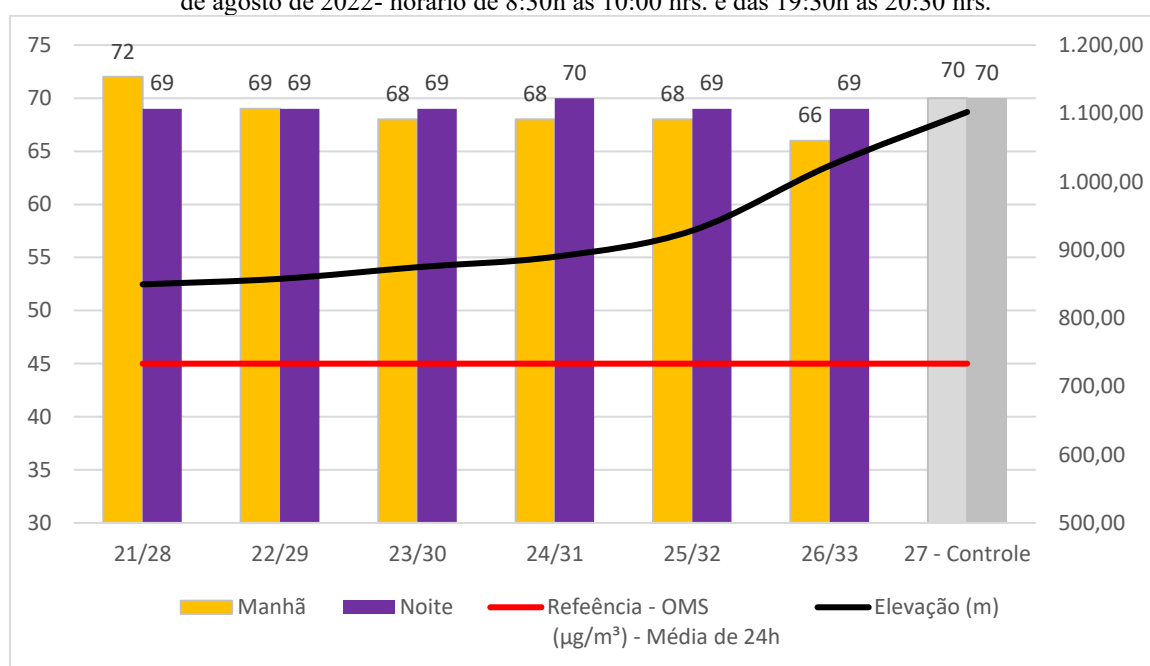
Figura 49: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Nossa Senhora do Carmo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As medições da qualidade do ar para a na Av. Silva Lobo com continuidade na Avenida Barão Homem de Melo, ocorridas no dia 3 de agosto/2022, indicaram valores de concentração também elevados de PM10 ao longo de todos os pontos de coleta (Figura 50). De modo particular, conforme metodologia concebida, esse trecho teve um aspecto em particular, que foi um recorte amostral comparativo das eventuais variações entre o período diurno e noturno. Nesse sentido, os pontos diurnos foram os mesmos pontos noturnos e foram agrupados da seguinte forma - 21/28, 22/29, 23/30, 24/31, 25/32 e 26/33.

**Figura 50:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo – 03 de agosto de 2022- horário de 8:30h às 10:00 hrs. e das 19:30h às 20:30 hrs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A média registrada para toda a via foi de  $68,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para o período diurno e  $69,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para o período noturno, ou seja, uma diferença de apenas  $0,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando que, para esse cenário em específico, não houve praticamente mudanças de concentrações significativas de um período para o outro. O ponto 21 foi que registrou o máximo de concentração com  $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , logo no início da via, nas proximidades do viaduto com a Av. Teresa Cristina, bairro Carlos Prates (FIG. 50). Contudo, esse valor de máxima não tem nenhum destaque em específico, uma vez que a diferença para os demais pontos foi de apenas  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nesse mesmo cenário, os valores de mínima não obtiveram nenhum destaque, sinalizando uma homogeneidade nos resultados obtidos, ainda que a circulação de veículos se diferencie bastante ao longo da via, bem como as diferenças de elevação que são bem significativas, que se inicia nas margens do

rio Arrudas (média de 800 m) e sobe bruscamente até o entroncamento com a Av. Raja Gabaglia (1.200 m).

Com base nos levantamentos estatísticos realizados, a correlação entre topografia e concentração de PM10 foi média, com  $r=0,73$ , para o período diurno e praticamente nula para o período noturno com  $r= -0,10$ . Esse cenário indica que, durante o dia, existia uma certa correlação entre as concentrações registradas e a topografia, contudo, durante a noite, essa correlação deixa de existir. Esse dado é especialmente importante, pois ele aponta para justamente o que as referências bibliográficas indicam que a radiação solar possui influência nas condições de concentração ao promoverem, por meio do ar ascendente, a mistura dos poluentes com o ar, sendo que a noite a tendência maior é de estabilidade, resultando na homogeneização dos espaços.

Importante ainda registrar que as condições atmosféricas registradas no dia 03 de agosto eram de tempo estável e de baixa velocidade dos ventos, o que seria propício para uma maior concentração nas porções mais baixas do terreno, o que aconteceu apenas no ponto 21, os demais apresentaram praticamente a mesma concentração ao longo de toda avia ainda que com diferenças topográficas substanciais. Por fim, o ponto de controle, localizado atrás da Serra do Curral, na região de Nova Lima, registrou valor elevado de  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , concentração esta muito semelhante à registrada ao longo e todo ao transecto realizado na Av. Silva Lobo - Avenida Barão Homem de Melo (FIG. 50).

Figura 51: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Barão Homem de Melo e Silva Lobo

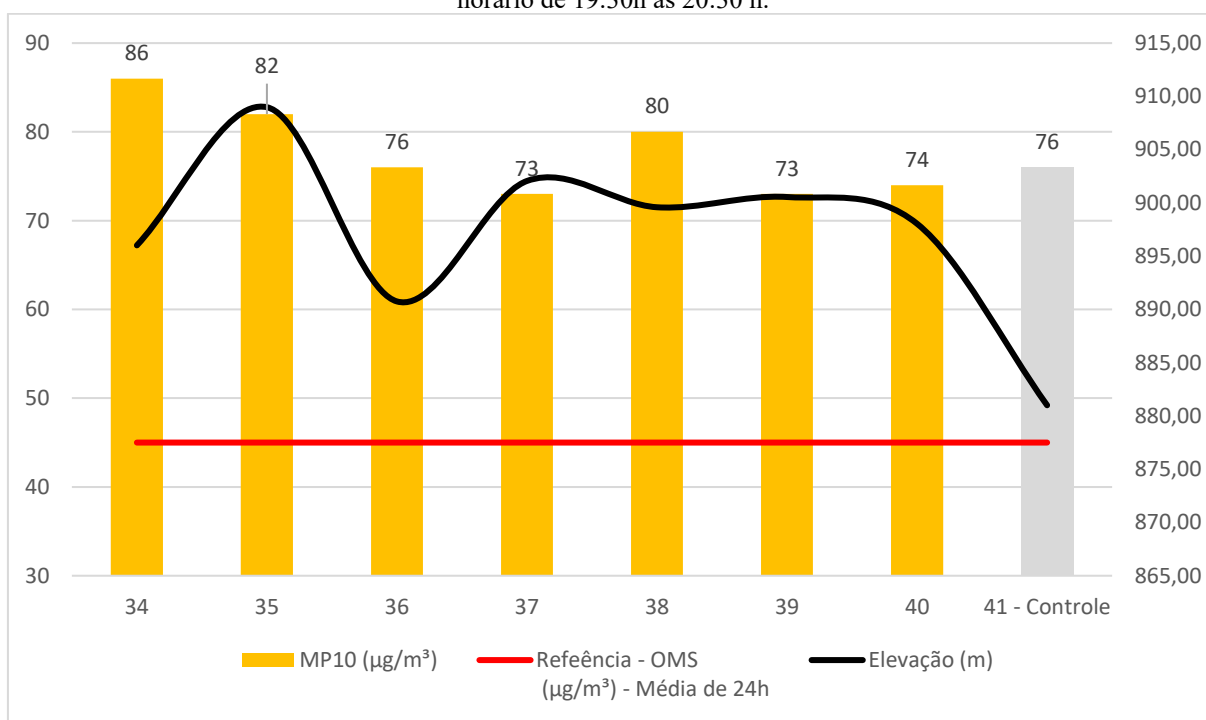


<p><b>LEGENDA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Ponto de Monitoramento - Av. Silva Lobo e Av Barão Homem de Melo</li> <li>● Ponto Controle</li> <li>— Principais trechos de monitoramento</li> <li>▭ Limite municipal</li> </ul>	<p><b>ESCALA GRÁFICA</b></p> <p>0 0,5 1 Km</p> <p>N</p> <p>Elaboração: Alceu Raposo - 30/09/2024 Fontes: Bairros e vias (Prefeitura de Belo Horizonte - BHMAP) Datum: SIRGAS2000 Fuso: 23S</p>	<p><b>LOCALIZAÇÃO</b></p>
---	--	---------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto às medições realizadas na rua Padre Eustáquio, no dia 5 de agosto/2022, indicou valores de concentração muito elevados de  $PM_{10}$  ao longo de todos os pontos de coleta (FIG. 52). Do ponto de vista metodológico, a escolha dessa via se deu por necessidade de avaliação do comportamento das vias locais em detrimento das grandes avenidas de escoamento e de rápida circulação em Belo Horizonte. Nesse sentido, a rua Padre Eustáquio é uma importante via de circulação na regional noroeste com função de ligação de fluxo entres os bairros Padre Eustáquio, Carlos Prades, Caiçara, Alípio de Melo e entorno.

**Figura 52:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Padre Eustáquio – 05 de agosto de 2022- horário de 19:30h às 20:30 h.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A média registrada para toda a via foi de  $77,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo o ponto 34 o máximo registrado com  $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , logo no início da via, nas proximidades com o elevador Dona Helena Greco, fato este que deve ter impulsionado registros um pouco mais elevados que os demais ao longo da via. Já os valores de mínima não obtiveram nenhum destaque, sendo eles os pontos 37 e 39 com  $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , muito próximo dos valores dos demais pontos que se seguiram (FIG. 52).

A correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$ , com base nos tratamentos estatísticos realizados, foi nula, com  $r=0,09$ , indicando que, para aquele período analisado, as concentrações de poluente possuíam nenhuma relação, o que era de se esperar com base no conhecimento bibliográfico. Registra-se, ainda, que as condições atmosféricas, ao longo do dia

05 de agosto, eram de tempo estável e de baixa velocidade dos ventos, o que seria propício para uma maior concentração nas porções mais baixas do terreno. Por fim, o ponto de controle (Av. Pedro II) também registou valores muito semelhantes ( $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) com a concentrações média da rua padre Eustáquio ( $77,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Figura 53: Mapa de localização dos pontos monitorados na Rua Padre Eustáquio

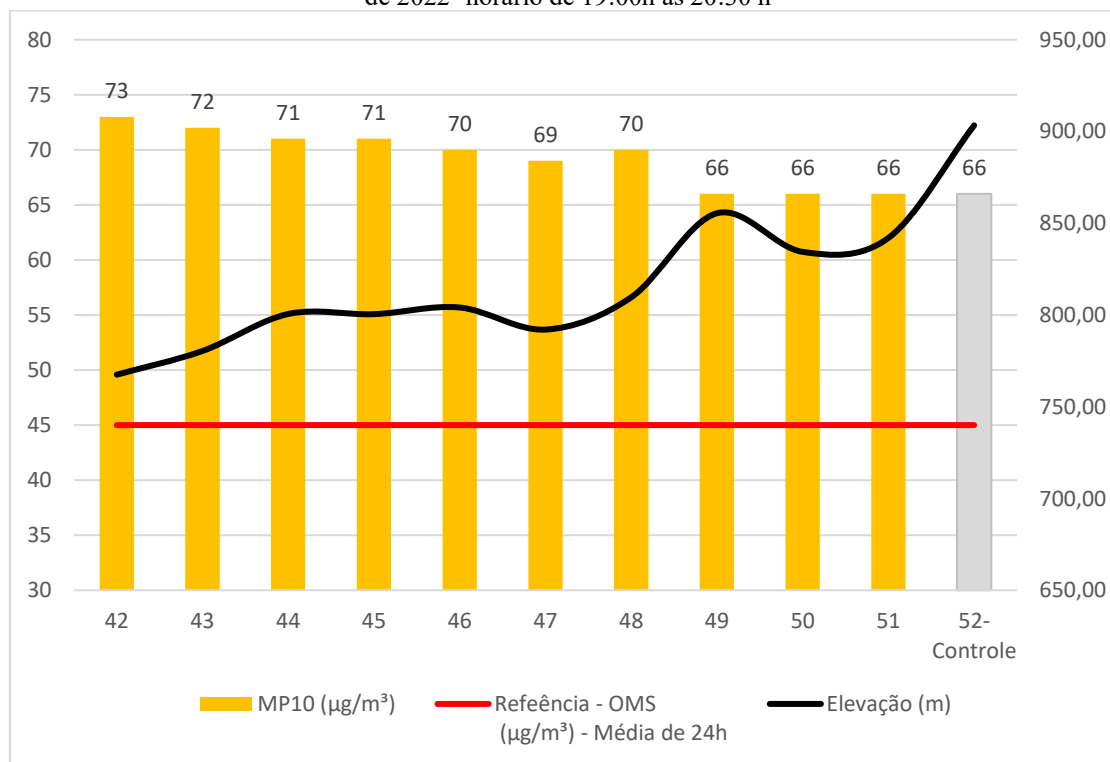


Fonte: Elaborado pelo autor.

No dia 8 de agosto, as medições se deram na Av. Presidente Antônio Carlos, na qual foram registradas concentrações muito elevadas de  $PM_{10}$  ao longo de todos os pontos de coleta. Trata-se de uma importante via de escoamento de grande fluxo de Belo Horizonte, com acesso ao corredor norte da RMBH e ao aeroporto de Confins. Ao longo dessa via, tem um importante meio sistema de transporte público viário, denominado de MOVE, com faixas exclusivas no corredor central. Um dos objetivos desse transecto era o acompanhamento noturno da formação de poluentes durante esse período em uma grande via de circulação.

A média registrada para toda a via foi de  $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo o ponto 42 o máximo registrado com  $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , logo no início da via, nas proximidades com o final da Linha Verde e Av. Cristino Machado, fato este que deve ter impulsionado registros um pouco mais elevados que os demais ao longo da via (FIG.54). Já os valores de mínima não obtiveram nenhum destaque, sendo eles os pontos 49, 50 e 51 com  $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , muito próximo do Complexo da Lagoinha, já no grande centro de Belo Horizonte. Destaca-se, ainda, a concentração em  $PM_{10}$  do ponto controle na Avenida Pedro II, com o mesmo valor ( $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dos demais pontos finais da Av. Presidente Antônio Carlos.

**Figura 54:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Presidente Antônio Carlos – 08 de agosto de 2022- horário de 19:00h às 20:30 h



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados de correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$ , com base nos tratamentos estatísticos realizados, foram negativos e altos, com  $r = -0,90$ , indicando que quanto

menor a cota de elevação, maior foram os registros de poluente, e quanto maior foram os registros de elevação, menores foram os resultados de  $PM_{10}$ . Nesse caso em específico foi a única via que registrou, de forma singular, o que era de se esperar para o comportamento entre topografia e concentração, uma vez que as condições de tempo, ao longo do dia 05 de agosto, eram ainda de estabilidade e baixa velocidade dos ventos.

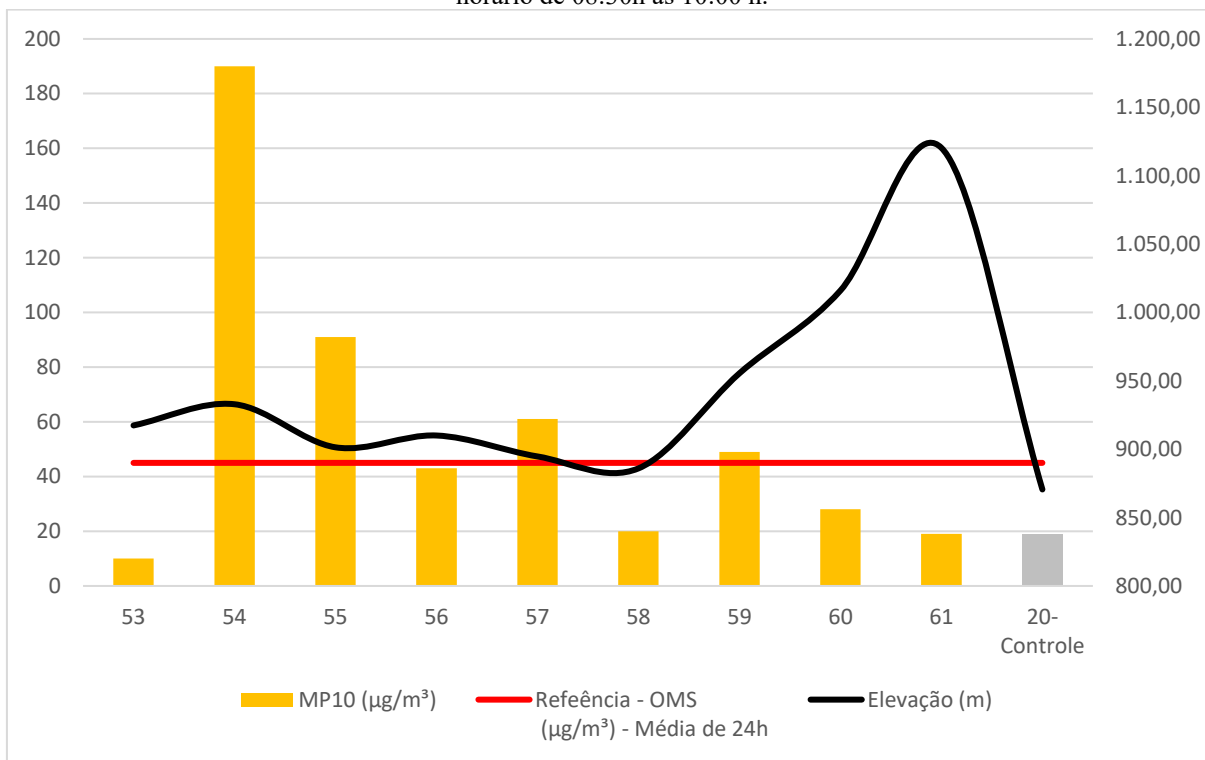
Figura 55: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Presidente Antônio Carlos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, finalizando o período de coleta de dados para a estação seca (inverno), no dia 20 de setembro, as medições se deram no Anel Rodoviário, que, por sua vez, registrou concentrações elevadas de  $PM_{10}$  ao longo de todos os pontos de coleta (FIG.56). Trata-se de uma importante via de escoamento de grande fluxo de Belo Horizonte, ligando as principais BR que chegam até a capital. O fluxo de caminhões pesados nessa via é significativo, e os engarrafamentos e acidentes são constantes.

**Figura 56:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Anel Rodoviário – 20 de setembro de 2022- horário de 08:30h às 10:00 h.



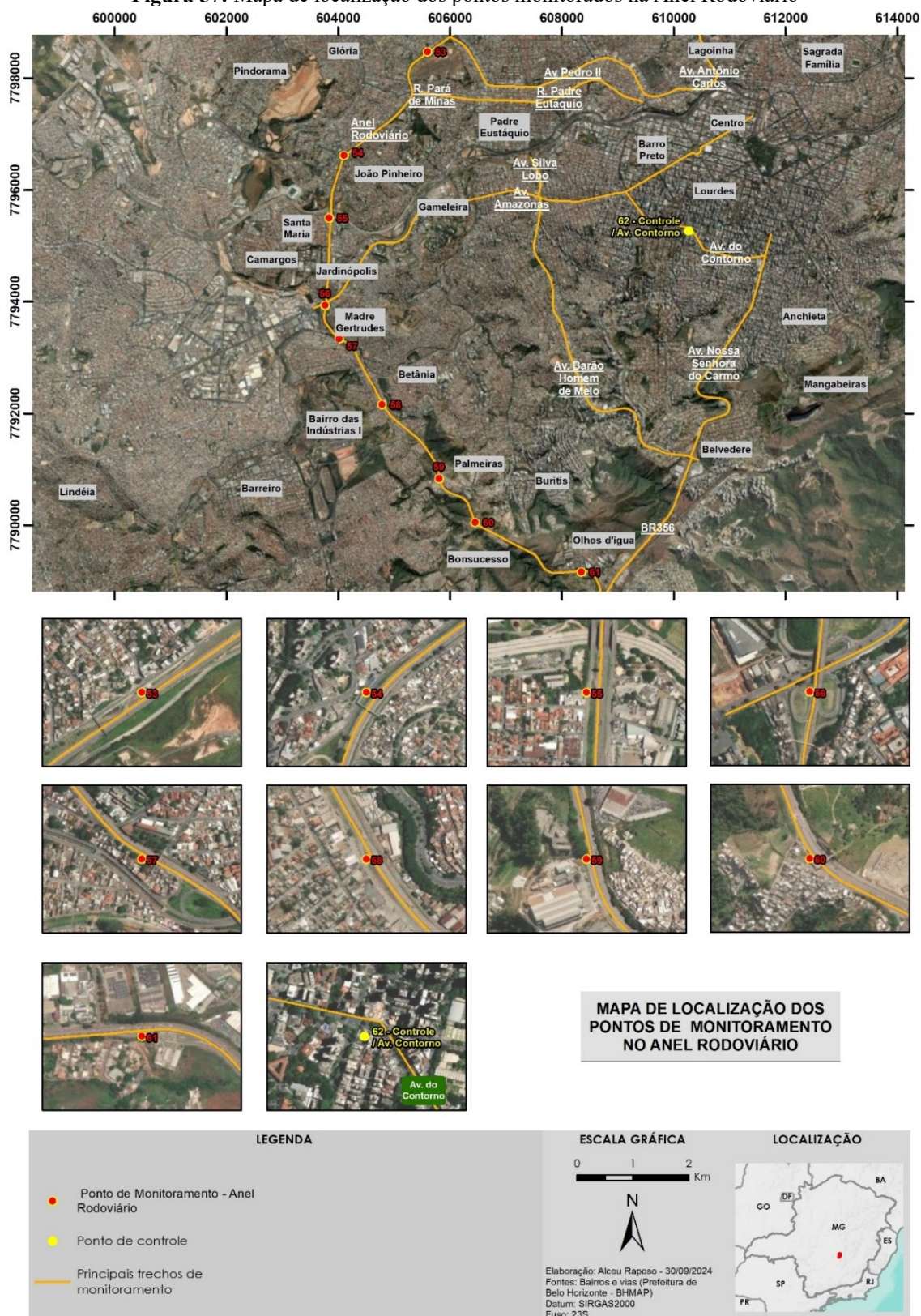
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A média registrada para toda a via foi de  $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo uma das mais baixas em relação às demais vias analisadas. O ponto 54 teve o maior registro de concentração de  $PM_{10}$  com  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , nas proximidades com a BR040 saída para Brasília, fato este que deve ter impulsionado registros bem mais elevados que os demais ao longo da via. Os valores de mínima foram, de certa forma, surpreendentes quando comparados aos das demais vias, com destaque para os pontos 53, 58 e 61. Tal fator estava relacionando as condições de entorno desses pontos, são áreas mais abertas com um bom escoamento de ar capaz de fazer as trocas de ar com mais eficiência.

Quanto aos dados de correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$ , com base nos tratamentos estatísticos realizados, foi negativo e praticamente nulo, com  $r = -0,24$ , indicando

não haver uma correlação forte entre a topografia e as concentrações de poluentes durante o período analisado. O resultado da correlação da altimetria no Anel Rodoviário, do ponto de vista da revisão bibliográfica, era muito esperado, uma vez que esse transecto é um dos que apresenta maior potencial de verificação desse fenômeno ao sair de valores de 900 m para 1.200m ainda dentro de Belo Horizonte.

Figura 57: Mapa de localização dos pontos monitorados na Anel Rodoviário



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.3.2 Estações fixas

Conforme apontado na metodologia, um outro grupo de dados igualmente importante foram as estações fixas de qualidade do ar sob responsabilidade, atualmente, da SEMAD. Essas estações são bastante robustas e com alto grau de confiabilidade dos dados. Os dados são gerados de hora em hora, durante 24 horas por dia, 365 dias por ano. Possuem informações de material particulado  $PM_{10}$  e vários outros gases.

Os dados filtrados do banco de dados histórico das estações seguiram fielmente os mesmos dias das análises anteriores para o período de inverno, ou seja, entre os dias 01/08/22 e 10/08/22 e, posteriormente, no intervalo dos dias 15/09/22 a 21/09/22, os quais foram marcados por tempo estável, pouca nebulosidade e ventos fracos. Conforme já descrito no capítulo de metodologia as estações disponíveis, em função do período pretendido, foram a PUC São Gabriel, PUC Barreiro e Contorno.

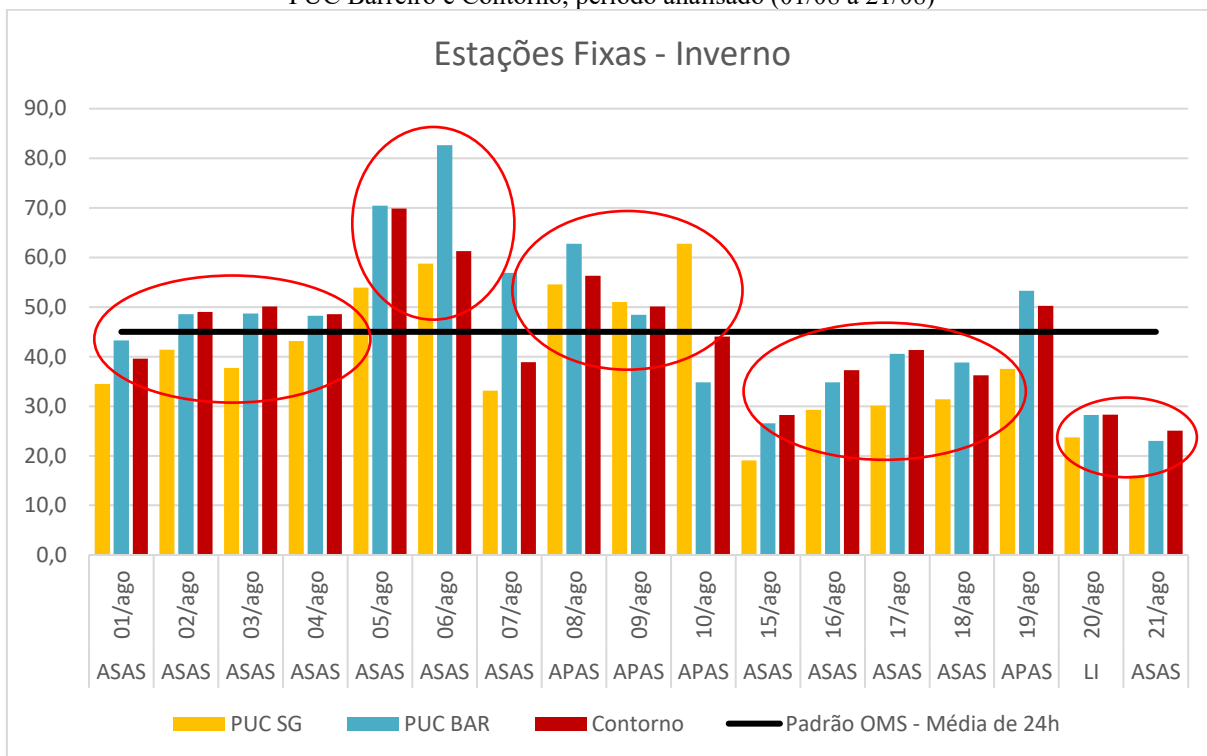
Os dados estatísticos a seguir demonstram a importância desse universo amostral para o presente estudo. Diante das informações coletadas é possível perceber que as três estações tiveram praticamente o mesmo comportamento de variação de concentração de poluentes ao longo do tempo, indicando uma interação direta com as condições de tempo registradas em cada período.

Ao longo do intervalo de análise durante o mês de agosto (inverno) de 2022, foi possível identificar que as três estações possuíram um comportamento muito próximos na qual foi possível identificar cinco eventos que estão registrados circularmente no gráfico abaixo para fins de melhor compreensão.

O primeiro evento, registrado entre os dias 01/08 e 04/08, foi marcado pela atuação dos ASAS e um comportamento das três estações muito semelhantes, com valores muito próximos da média máxima de 24 horas indicados pela OMS que é de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$  (FIG. 58). Nos dias seguintes, segundo evento entre 05/08 e 06/08, com a intensificação do ASAS, as três estações registraram simultaneamente valores acima do indicado pela OMS, com concentrações de  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  até  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Na sequência, mesmo com a entrada de um novo sistema atmosférico, o APAS, entre os dias 08/08 e 10/08, o terceiro evento indica o mesmo padrão para as três estações, ainda acima dos valores de referência da OMS, porém em patamares entre  $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No quarto evento, entre os dias 15/08 e 18/08, com a atuação dos APAS, as concentrações registradas foram abaixo dos valores da OMS, porém ainda com valores entre  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tendo as três estações o mesmo comportamento. Por fim, o quinto evento,

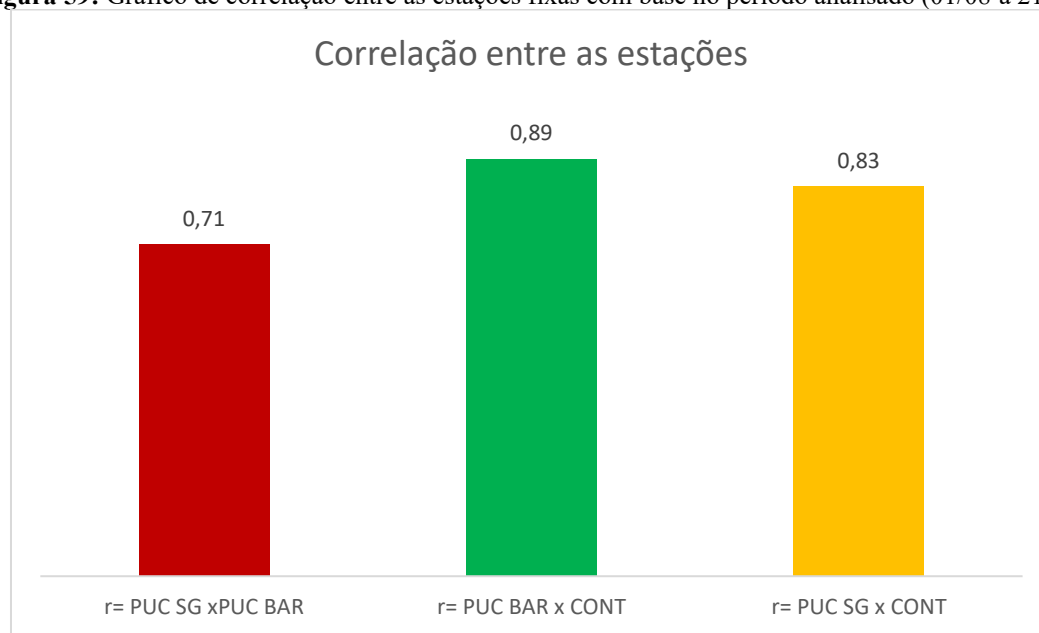
nos dias 20/8 e 21/8, depois da atuação de uma LI, pela primeira vez, as concentrações nas três estações ficam abaixo dos 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Figura 58:** Gráfico de média das concentrações de 24 horas de PM10 das estações fixas - PUC São Gabriel; PUC Barreiro e Contorno, período analisado (01/08 a 21/08)



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A Figura 59 a seguir, apresenta as correlações do período analisado (01/08 a 21/08) entre as três estações fixas.

**Figura 59:** Gráfico de correlação entre as estações fixas com base no período analisado (01/08 a 21/08)

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2. Período Chuvoso (Verão)

Os trabalhos de campo, durante o período chuvoso (verão), foram realizados entre os dias 30/10/23 e 10/11/23, aos quais foram marcados por tipos de tempo instáveis com alta nebulosidade e ventos fracos a médios, situação ideal para realização do experimento no período do verão no qual se buscava a interação de poluentes com a atmosfera mais instável.

### 5.2.1. Condições atmosféricas

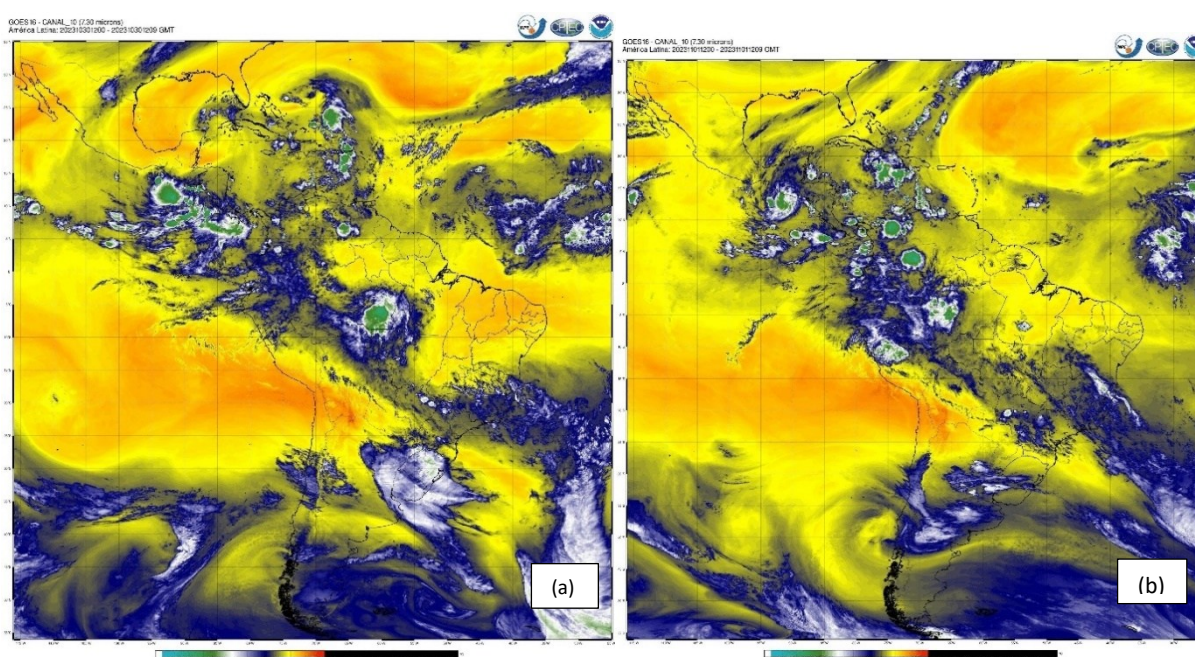
De acordo com os dados observacionais do satélite, obtidos junto ao banco de dados do CPTEC, observa-se que a atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e os Sistemas Frontais (SF) tiveram como consequência a instalação de linhas de instabilidade (LI) e, assim, foram os principais responsáveis pelas condições meteorológicas nesse período.

Em termos gerais, a primeira semana outubro/novembro, entre os dias 30/10 a 03/11, foi marcada pela atuação de uma Frente Fria (FF) associada a uma baixa pressão, em praticamente em toda região sudeste do Brasil. Nesse contexto, trouxe bastante nebulosidade e instabilidade para o sistema, com tendência de queda da pressão atmosférica durante esse período, ventos predominantes do quadrante leste, umidade relativa do ar mais elevada e

precipitação nos dias 30/10, 01/11 e 03/11 foram os elementos preponderantes no cenário de interação terra-atmosfera.

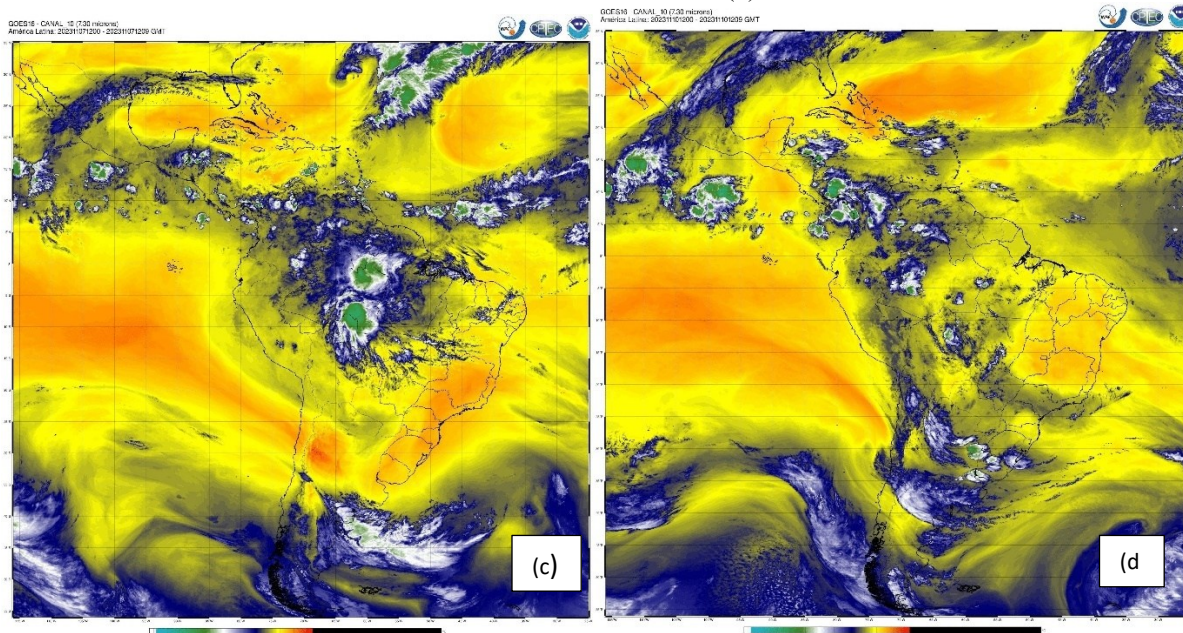
A atuação da Frente Fria (FF) neste período, entres os dias 30/10 e 03/11, favoreceu baixa amplitudes térmicas diárias que, em média, ficaram abaixo de 10,0°C. A alta nebulosidade associada à entrada da Frente Fria (FF) e à atmosfera aquecida foram responsáveis por ocasionar precipitação durante três dias, contudo, não foram chuvas significativas, conforme poderá ser visto nas Figuras 60, 61, 62 e 63.

**Figura 60:** Imagens do satélite meteorológico GOES-16 (Canal 10) IR de 12GMT do dia 31/10/2023 (a) e das 12GMT do dia 01/11/2023 (b).



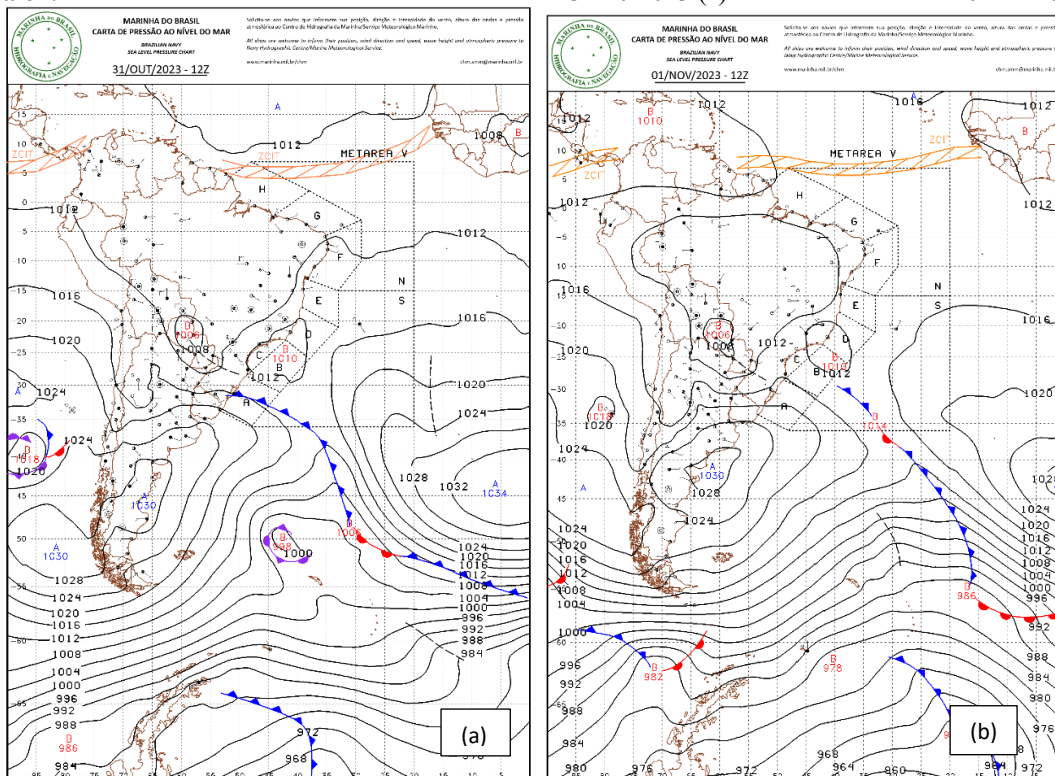
Fonte: INPE/CPTEC (2024).

**Figura 61:** Imagens do satélite meteorológico GOES-16 (Canal 10) IR de 12GMT do dia 07/11/2023 (c) e das 12GMT do dia 10/11/2023 (d).



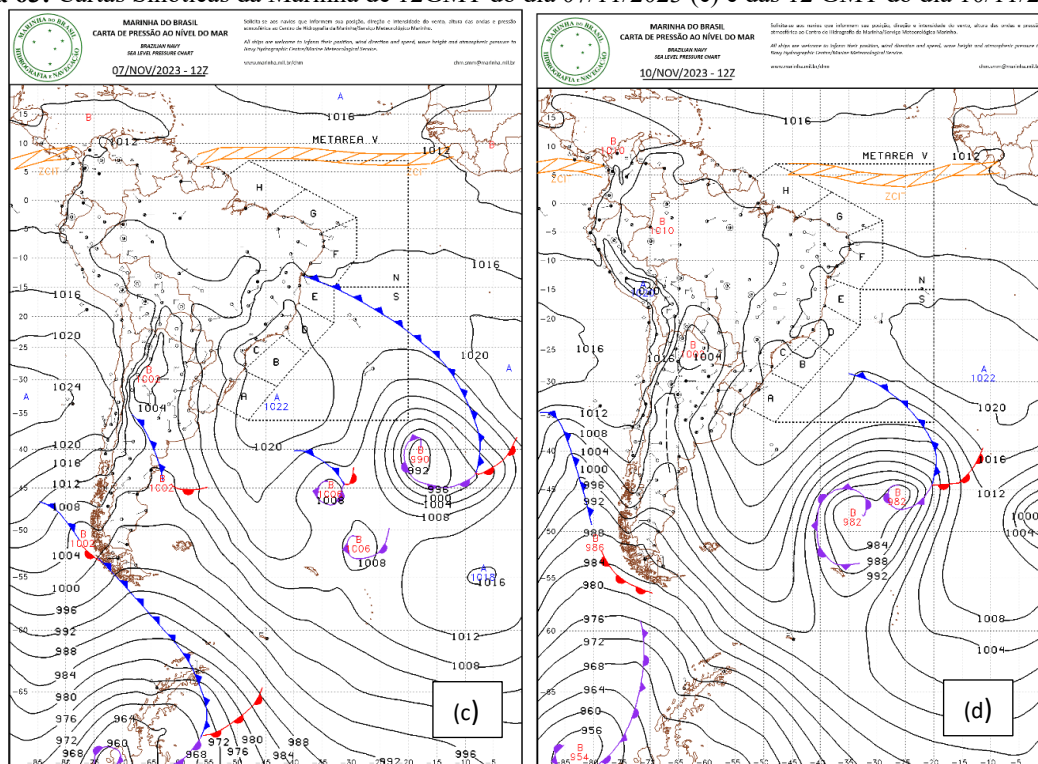
Fonte: INPE/CPTEC (2024).

**Figura 62:** Cartas Sinóticas da Marinha de 12GMT do dia 31/10/2023 (a) e das 12 GMT do dia 01/11/2023 (b).



Fonte: Marinha do Brasil (2024).

Figura 63: Cartas Sinóticas da Marinha de 12GMT do dia 07/11/2023 (c) e das 12 GMT do dia 10/11/2023 (d).



Fonte: Marinha do Brasil (2024).

Importante observar que, após a entrada da Frente Fria (FF), o período que se segue, entre os dias 01 e 06 de novembro, tem como condições de tempo observado a atuação de uma Linha de Instabilidade - LI -, condicionando uma atmosfera instável, alta nebulosidade, alta umidade relativa e ventos de fraco a moderado, com presença de baixo acumulados de precipitação.

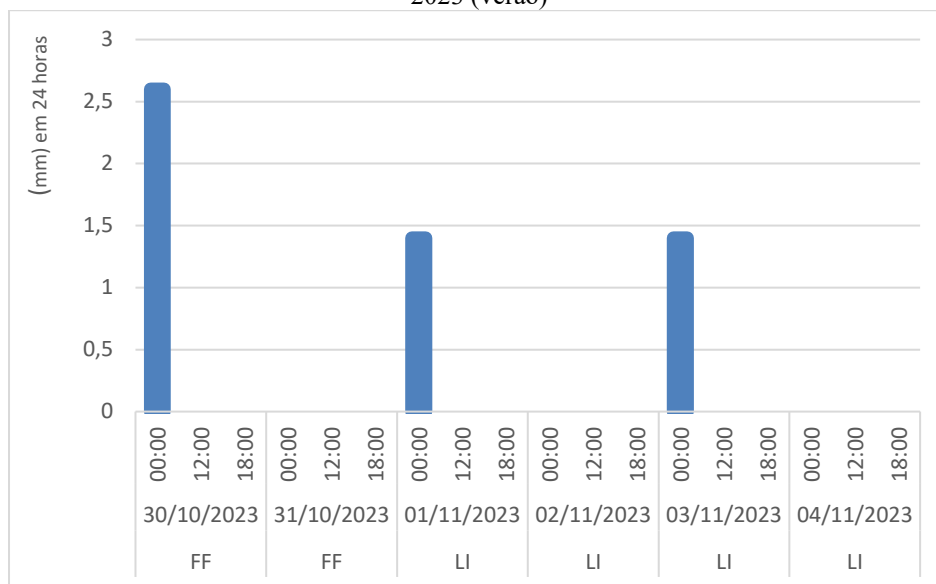
Já no período seguinte, entre os dias 07 e 10 de novembro, deram lugar a um sistema de alta pressão em todo o sudeste brasileiro devido à intensificação do ASAS. As consequências dessa atuação deram origem a uma queda importante da umidade relativa do ar baixa, a um aumento da pressão atmosféricas nos dias seguintes, a ausência de precipitação e a baixa nebulosidade, resultando em uma atmosfera mais estável.

5.2.2. *Variação tempo-espacial dos parâmetros atmosféricos*

Apesar do registro de chuvas entre os dias 30/10, 01/11 e 03/11, durante os trabalhos de campo, não houve precipitação registrada nas vias em que houve a coleta de dados (FIG.64). Conforme já registrado, a atuação e a permanência por alguns dias de uma LI associada a uma FF nesse período (30/10 a 06/11) resultaram em índices elevados de umidade relativa do ar na

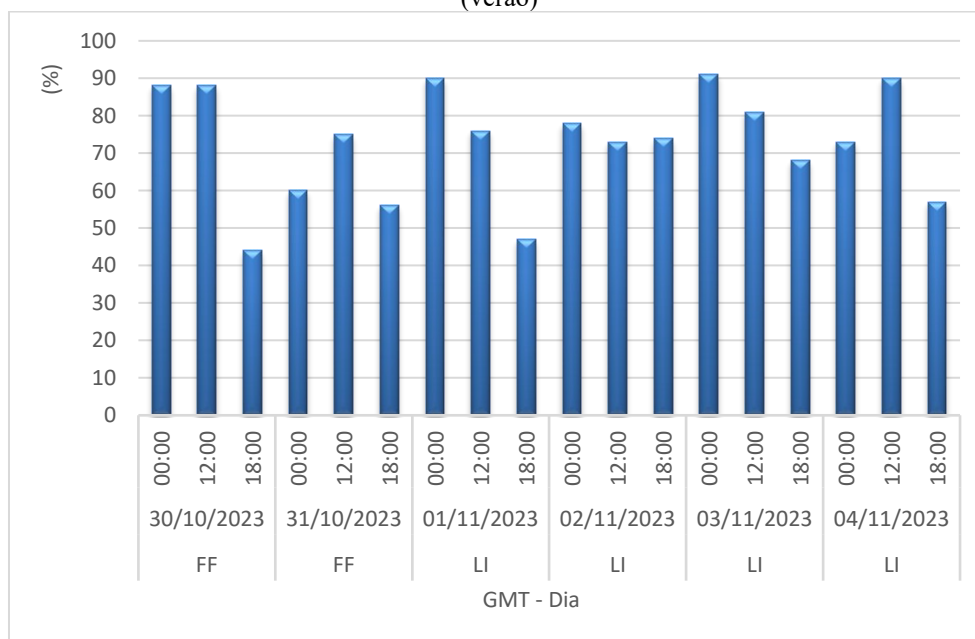
capital com uma média 67,7%, chegando a registrar valores de até 90% nos primeiros dias com a entrada da FF (FIG. 65 e 66).

**Figura 64:** Gráfico de precipitação total (mm) em 24 horas no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão)

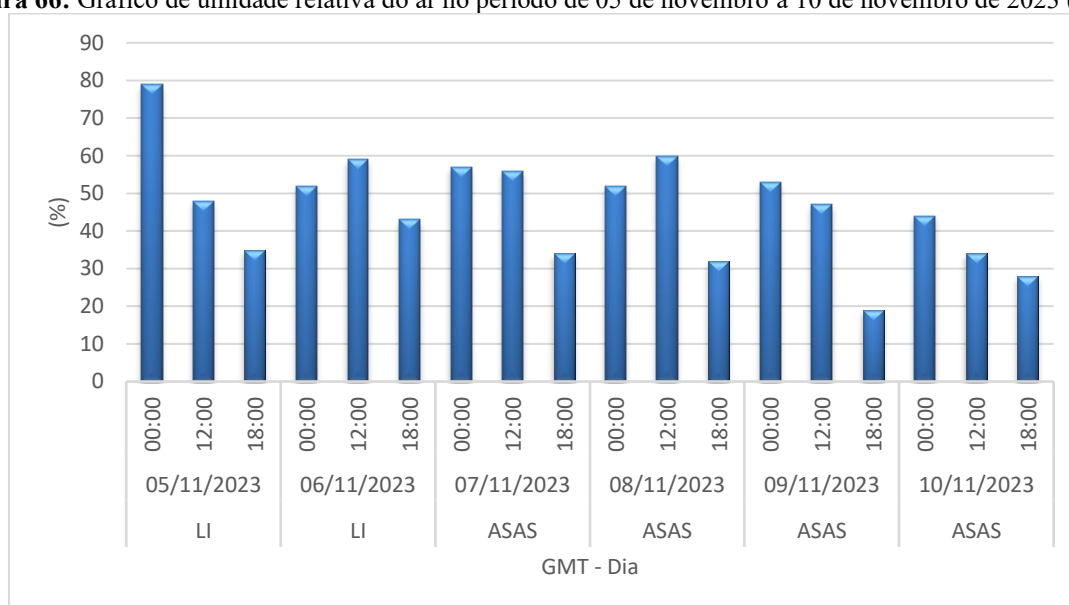


Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 65:** Gráfico de umidade relativa do ar (%) no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão)

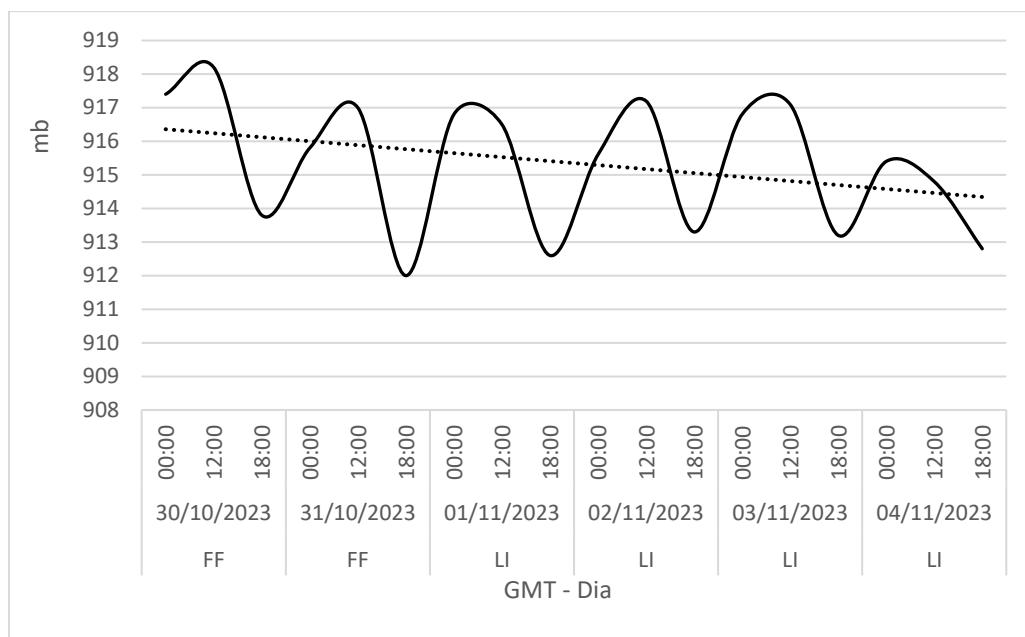


Fonte: Elaborado pelo autor.

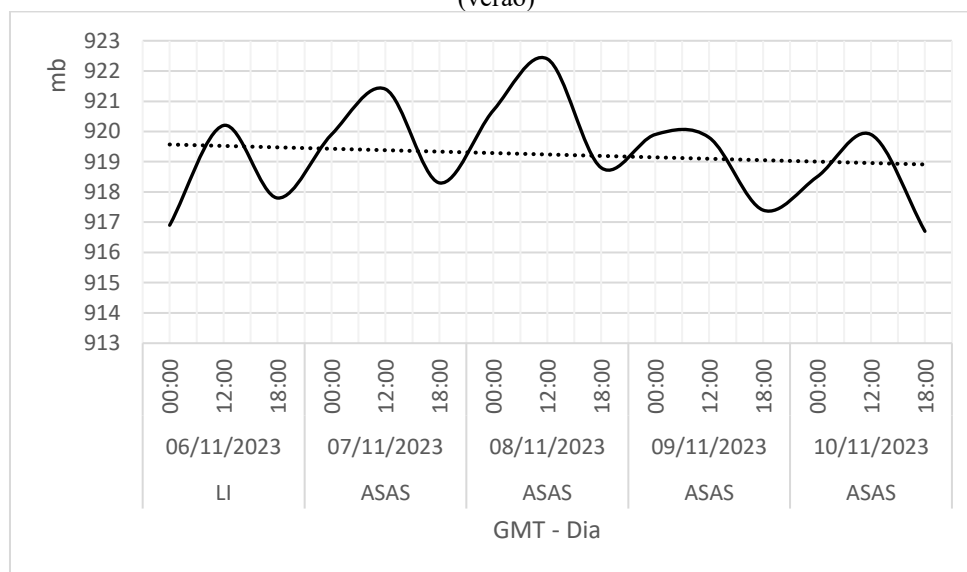
**Figura 66:** Gráfico de umidade relativa do ar no período de 05 de novembro a 10 de novembro de 2023 (verão)

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

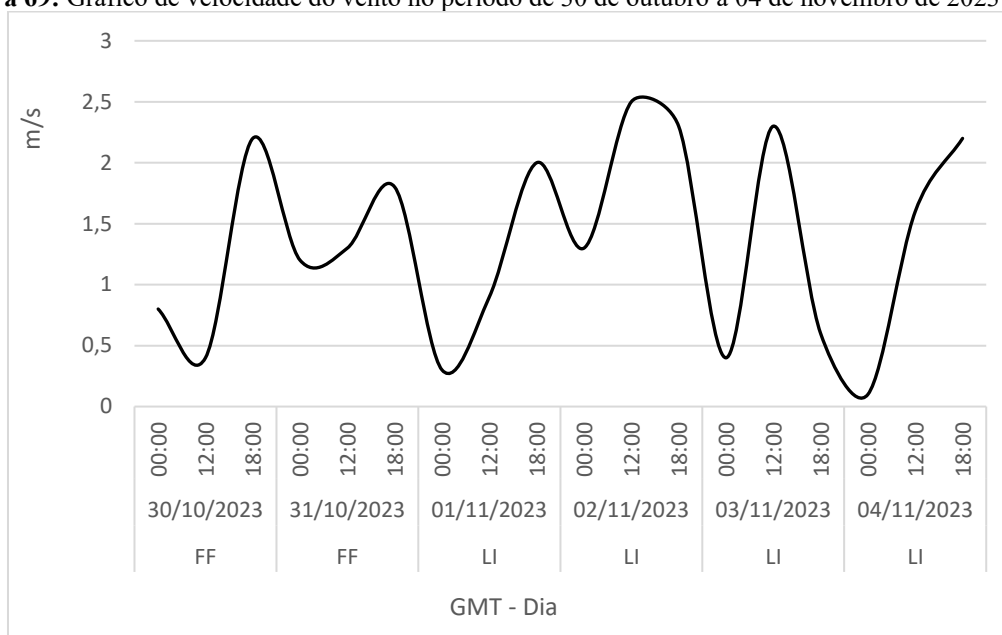
A pressão atmosférica se manteve em queda durante a atuação da FF e LI, com média de 915 mb entre os dias período 30/10 a 06/11 devido à formação de um centro de baixa pressão que se estendeu em grande parte do continente. Ao longo dos dias 07/11 a 10/11, a pressão atmosférica começou a subir ligeiramente à medida que a ASAS se intensificava no continente, chegando a registrar no pico 922,8 mb no dia 08/11 (FIG. 67 e 68). Já os ventos se mantiveram predominantes do quadrante leste, alternando ao longo do dia para nordeste e sudeste, com velocidade média baixa de 1,83 m/s (FIG. 69 e 70).

**Figura 67:** Gráfico de pressão atmosférica no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023(verão)

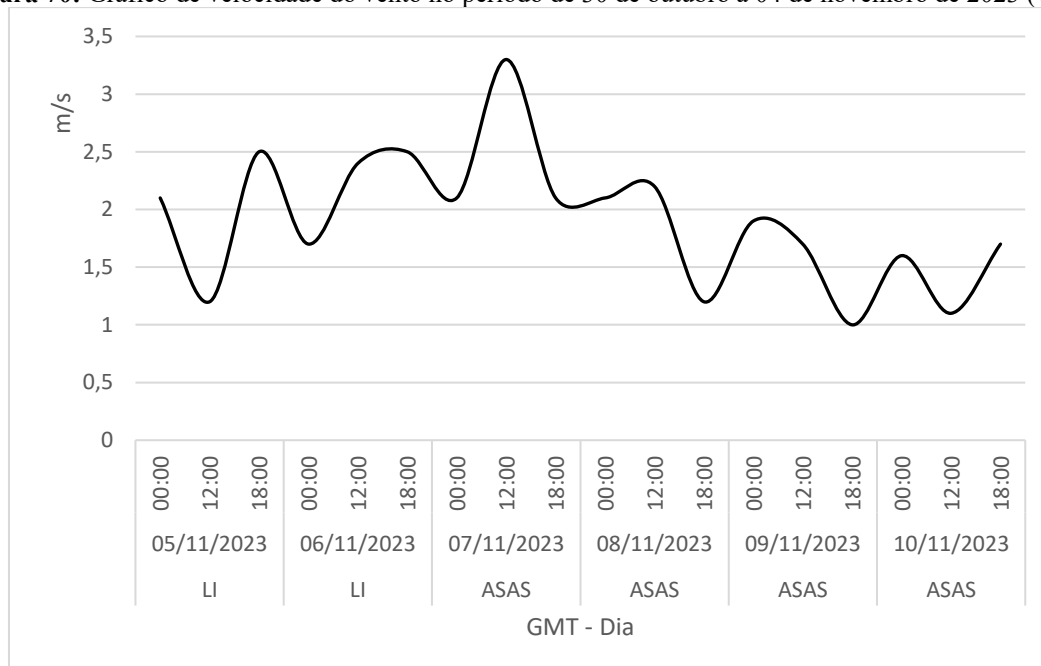
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 68:** Gráfico de pressão atmosférica (mb) no período de 05 de novembro a 10 de novembro de 2023 (verão)

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 69:** Gráfico de velocidade do vento no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão)

Fonte: Elaborado pelo autor.

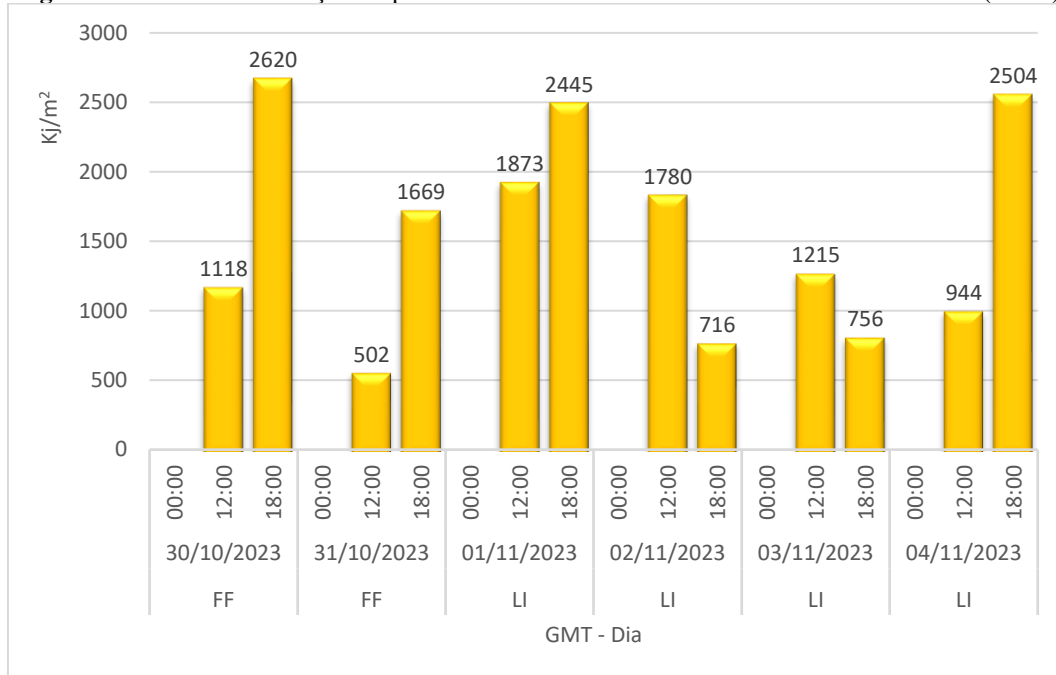
**Figura 70:** Gráfico de velocidade do vento no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão)

Fonte: Elaborado pelo autor.

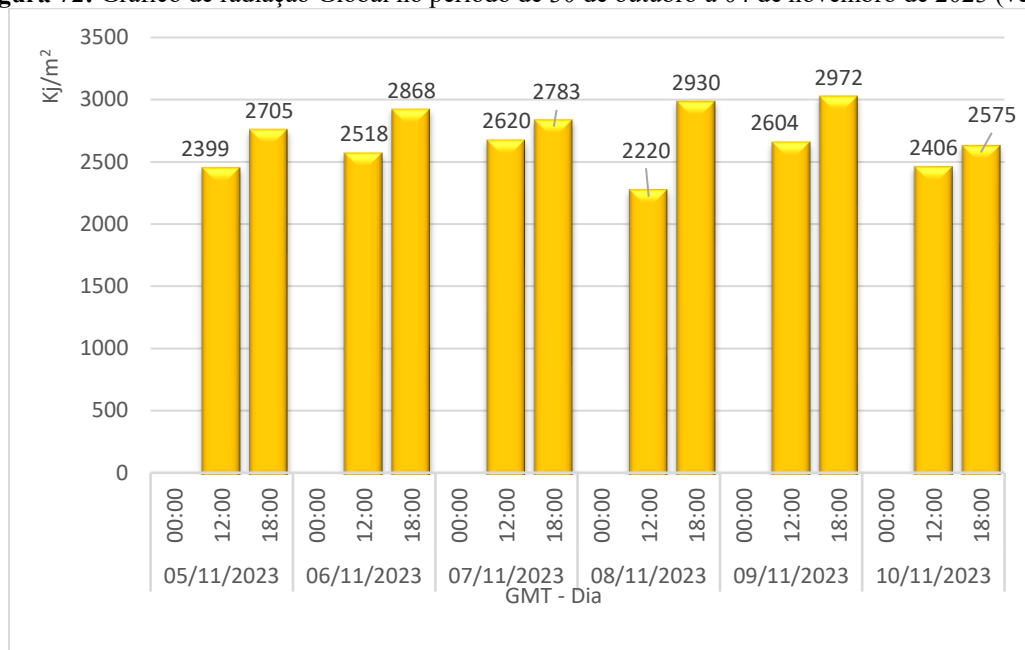
A baixa nebulosidade dada à atuação do ASAS não chegou a influenciar as amplitudes térmicas diárias, que se mantiveram abaixo de 10,0°C em média. A temperatura média diária girou em torno dos 22,8°C, máximas de até 32,8°C (10/11) e mínima de 20,4°C (08/11). A radiação global manteve-se elevada durante praticamente todos o intervalo analisado, chegando a valores diários ao final das tardes próximos a 3000 kJ/m<sup>2</sup> durante a atuação do ASAS (FIG. 71 e 72). Esses valores foram um pouco menores quando da atuação de um LI (30/10 a 06/11)

que gerou uma maior nebulosidade e, conseqüentemente, uma queda nos valores de radiação global para valores mínimos de até 500 KJ/m<sup>2</sup> no dia 31/10.

**Figura 71:** Gráfico de radiação no período de 05 de novembro a 10 de novembro de 2023 (verão)



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 72:** Gráfico de radiação Global no período de 30 de outubro a 04 de novembro de 2023 (verão)

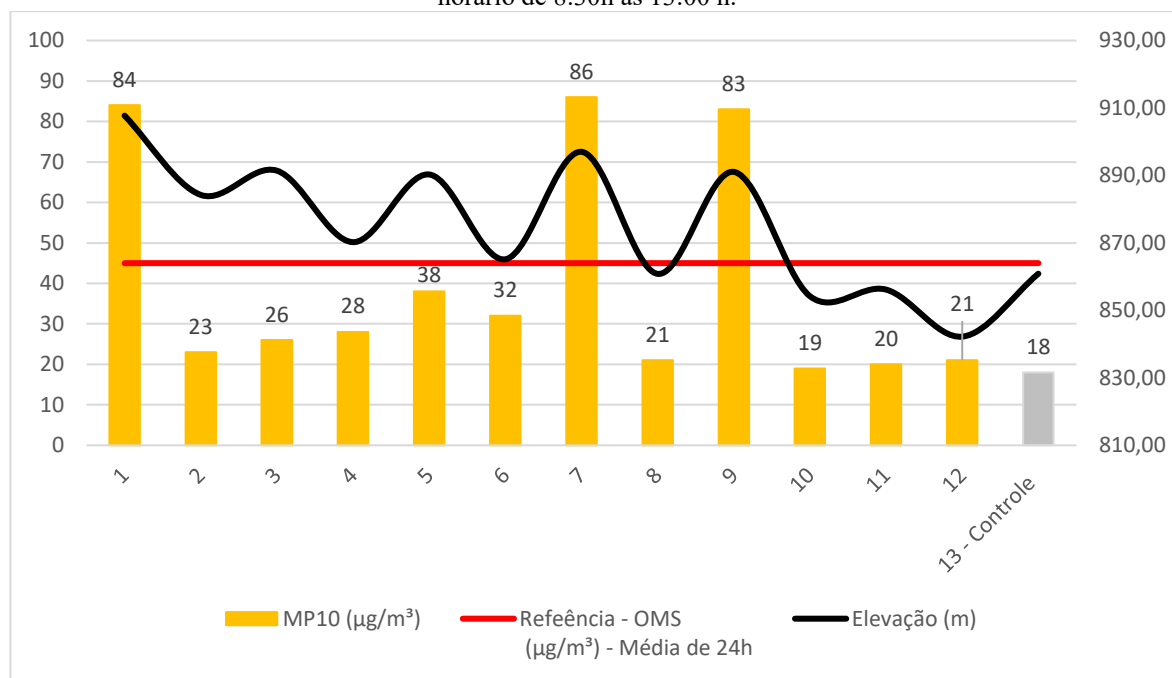
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.3. Resumo estatístico dos dados

#### 5.2.3.1 Estações móveis

Os dados de monitoramento da qualidade do ar para a Av. Amazonas, no dia 30 de outubro de 2023, apresentaram valores de concentração elevados de  $PM_{10}$  em três pontos (Pontos 01, 07 e 09) de coleta (FIG.73). A média registrada para toda a via foi de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo o ponto 7 o máximo registrado com  $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Importante salientar que os três valores de máxima concentração registrados durante o monitoramento, a despeito das relações topográficas indicadas pelas referências bibliográficas, são os locais de maior elevação, conforme pode ser visto no gráfico abaixo.

**Figura 73:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Amazonas - 30 de outubro de 2023- horário de 8:30h às 13:00 h.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Com base nos levantamentos estatísticos realizados, a correlação entre topografia e concentração de  $\text{PM}_{10}$  foi média, com  $r=0,76$ . Importante ressaltar que as condições atmosféricas registradas eram de tempo instável, umidade elevada e registro de precipitação naquele dia, fatores estes propícios a condições de trocas gasosas na atmosfera e à altura da camada de mistura.

Por fim, o ponto de controle (Av. Pedro II) também registrou valores menores e semelhantes ( $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), em média, com as concentrações ao longo da Av. Amazonas.

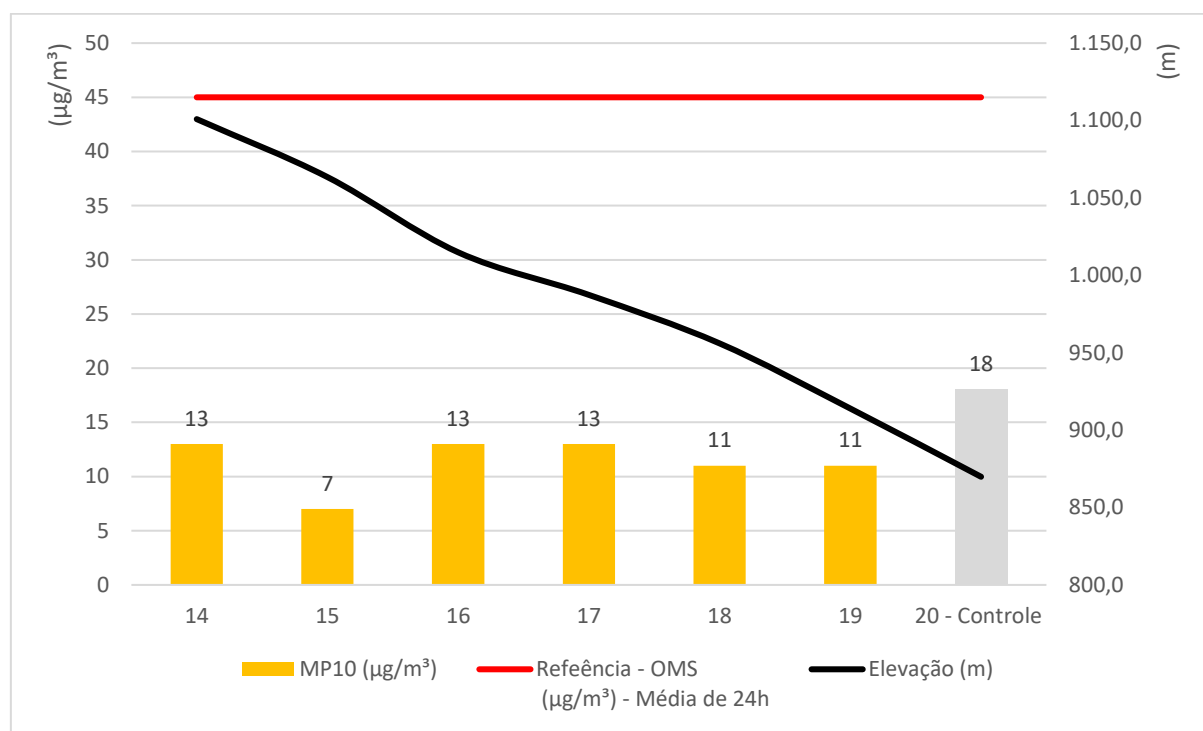
Figura 74: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Amazonas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O monitoramento da qualidade do ar para a Av. Nossa Senhora do Carmo, no dia 31 de outubro de 2023, indicou valores de concentração baixos de  $PM_{10}$  ao longo de todos os pontos de coleta (FIG 75). A média registrada para toda a via foi de  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo o ponto 15 o menor valor registrado  $07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , logo no início da via, nas proximidades da curva do Pontão Lar Shopping. Já os demais valores ficaram entre  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Como nesse dia ainda estava sobre atuação de uma LI, gerando condições para boas trocas na atmosfera, os valores apresentados indicaram, de certa forma, a eficiência da circulação do ar atmosférico, exercendo uma função de “limpeza” no sistema.

**Figura 75:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Nossa Senhora do Carmo – 31 de outubro de 2023- horário das 18:30h às 21:00 h.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos levantamentos estatísticos realizados, a correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$  foi baixa, com  $r=0,52$ , indicando que, para aquele período analisado, as concentrações de poluente possuíam relação baixa com a topografia, apesar de se tratar de um transecto com boas diferenças topográficas para se verificar tais condições. Por fim, o ponto de controle (Av. Contorno, esquina com Av. Prudente de Moraes) também registrou valores muito semelhantes ( $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) com relação as concentrações ao longo da Av. Nossa Senhora do Carmo.

Figura 76: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Nossa Senhora do Carmo.

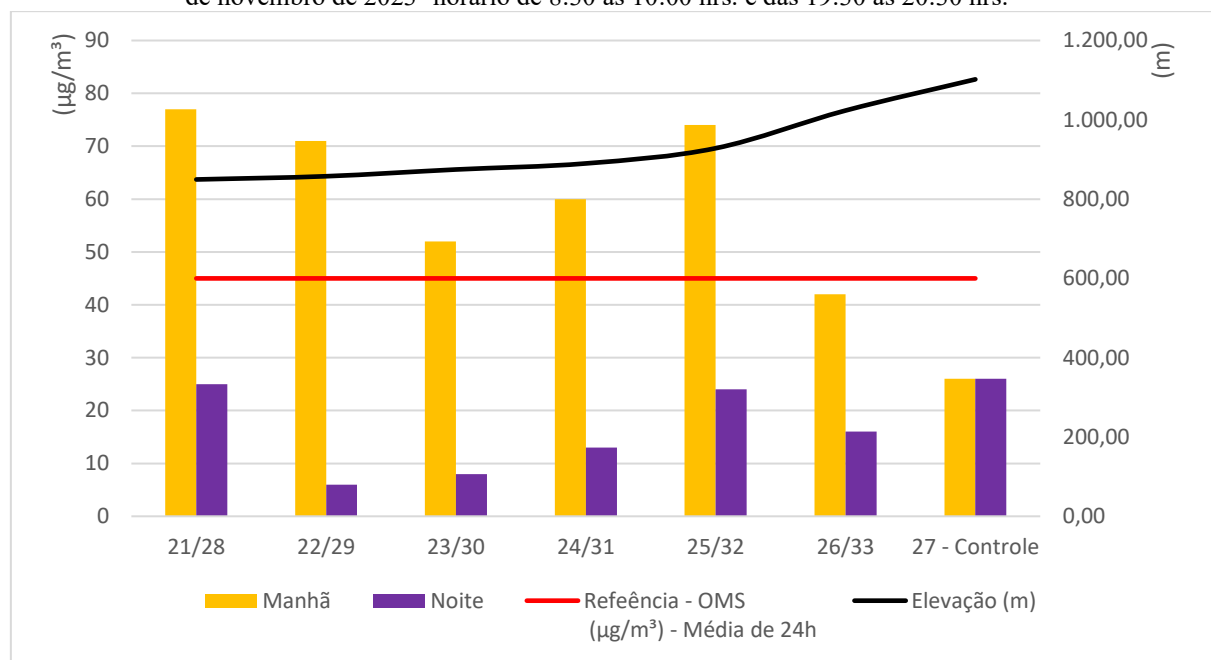


Fonte: Elaborado pelo autor .

As medições da qualidade do ar para a Av. Silva Lobo com continuidade na Av. Barão Homem de Melo ocorreram no dia 01 de novembro de 2023 e indicaram valores de concentração elevados de  $PM_{10}$  para grande parte dos pontos de coleta. Importante salientar novamente, conforme metodologia concebida, esse trecho teve um aspecto em particular que foi um recorte amostral comparativo das eventuais variações entre o período diurno e noturno. Nesse sentido, os pontos diurnos foram os mesmos pontos noturnos e estavam agrupados da seguinte forma – 21/28, 22/29, 23/30, 24/31, 25/32 e 26/33.

A média registrada para toda a via foi de  $62,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para o período diurno e  $16,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para o período noturno, ou seja, uma diferença superior a  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando que, para esse cenário em específico, houve mudanças de concentrações significativas de um período para o outro (FIG 77). O ponto 21 foi que registrou o máximo de concentração com  $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , logo no início da via, nas proximidades do viaduto com a Av. Teresa Cristina, bairro Carlos Prates, seguido dos pontos 22 e 25. Nesse mesmo cenário, os valores de mínima não obtiveram nenhum destaque, sinalizando uma homogeneidade nos resultados obtidos, ainda que a circulação de veículos se difere bastante ao longo da via, bem como as diferenças importantes topográficas (800m e 1200m) entre os dois extremos da via. Chama-se ainda a atenção para o fato de que, durante o período da noite, as concentrações de  $PM_{10}$  caíram drasticamente.

**Figura 77:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo – 01 de novembro de 2023- horário de 8:30 às 10:00 hrs. e das 19:30 às 20:30 hrs.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Com base nos levantamentos estatísticos realizados, a correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$  foi alta, com  $r=0,86$ , para o período diurno, e muito baixa para o período noturno, com  $r= -0,46$ . Esse cenário indica que, durante o dia, existia uma certa correlação entre as concentrações registradas e a topografia, contudo, durante a noite, essa correlação deixa de existir.

Figura 78: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Silva Lobo e Barão Homem de Melo

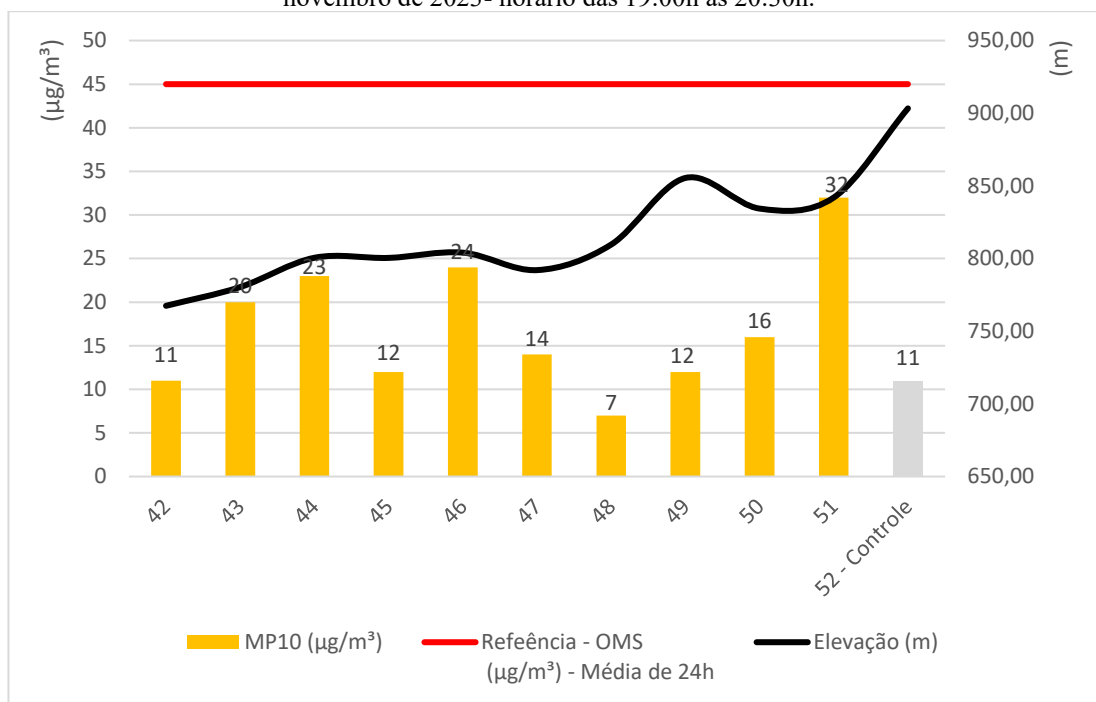


<p><b>LEGENDA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">●</span> Ponto de Monitoramento - Av. Silva Lobo e Av Barão Homem de Melo</li> <li><span style="color: yellow;">●</span> Ponto Controle</li> <li><span style="border-bottom: 1px solid yellow; width: 20px; display: inline-block;"></span> Principais trechos de monitoramento</li> <li><span style="border: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; display: inline-block;"></span> Limite municipal</li> </ul>	<p><b>ESCALA GRÁFICA</b></p> <p>0    0,5    1 Km</p> <p>Elaboração: Alceu Raposo - 30/09/2024 Fontes: Bairros e vias (Prefeitura de Belo Horizonte - BRMAP) Datum: SIRGAS2000 Fuso: 23S</p>	<p><b>LOCALIZAÇÃO</b></p>
--	---	---------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

No dia 06 de novembro de 2013, as medições foram realizadas na Av. Presidente Antônio Carlos, a qual foram registradas concentração muito menores de  $PM_{10}$  ao longo de todos os pontos de coleta. A média registrada para toda a via foi de  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo o ponto 51 o máximo registrado com  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ao final da via, nas proximidades do Complexo da Lagoinha (FIG 79). Já os valores de mínima foram o grande destaque ao longo de toda a via com registro de até  $07 \mu\text{g}/\text{m}^3$  no ponto 48. Destaca-se ainda a concentração de  $PM_{10}$  do ponto controle na Avenida Pedro II, com os mesmos valores médios baixos de  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Figura 79:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Av. Presidente Antônio Carlos – 06 de novembro de 2023- horário das 19:00h às 20:30h.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados de correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$ , com base nos tratamentos estatísticos realizados, praticamente nulo, com  $r = -0,04$ , indicando que, durante o período de verão, não foi possível correlacionar a topografia com a concentração, conforme pode ser observado no inverno.

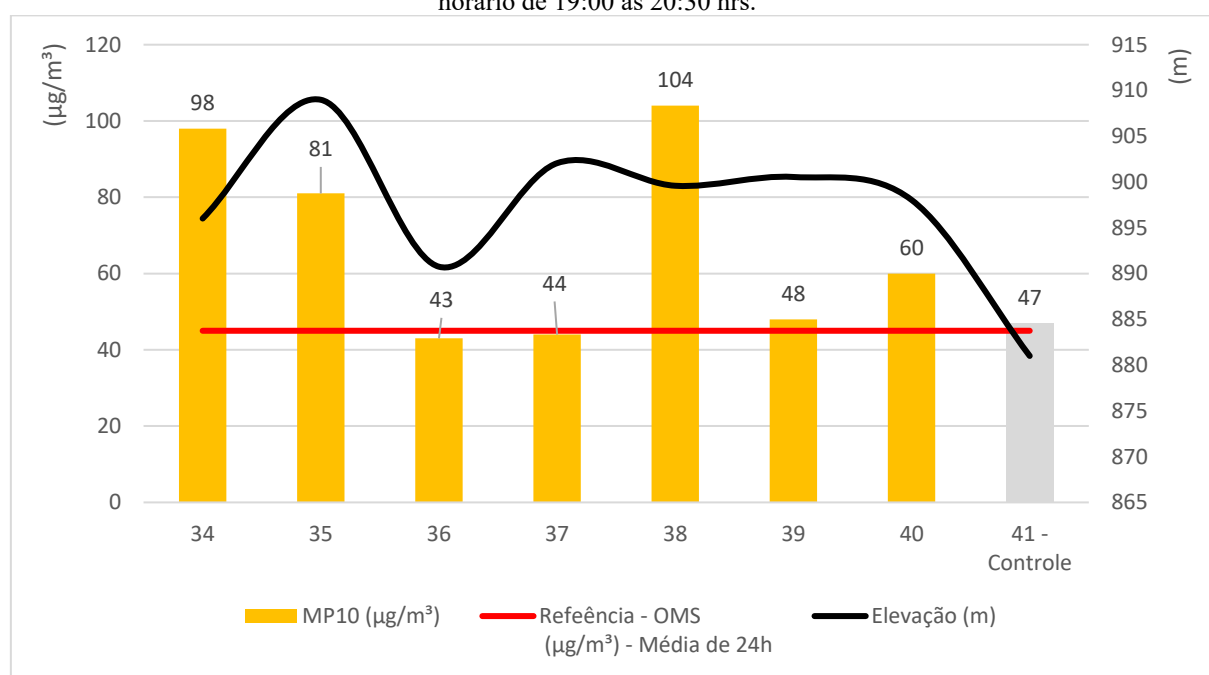
Figura 80: Mapa de localização dos pontos monitorados na Av. Presidente Antônio Carlos



Fonte: Elaborado pelo autor.

As medições realizadas na rua Padre Eustáquio, no dia 10 de novembro de 2023, indicaram valores de concentração muito elevados de  $PM_{10}$  ao longo de todos os pontos de coleta. A média registrada para toda a via foi de  $68,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo os pontos 34 e 35 com valores de  $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , logo no início da via, nas proximidades com o elevado Dona Helena Greco, fato este que deve ter impulsionado registros um pouco mais elevados que os demais ao longo da via (FIG 81). Outro ponto de máxima foi o 38, no meio do traçado, com concentração de  $PM_{10}$  de  $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Figura 81:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Padre Eustáquio – 10 de novembro de 2023- horário de 19:00 às 20:30 hrs.

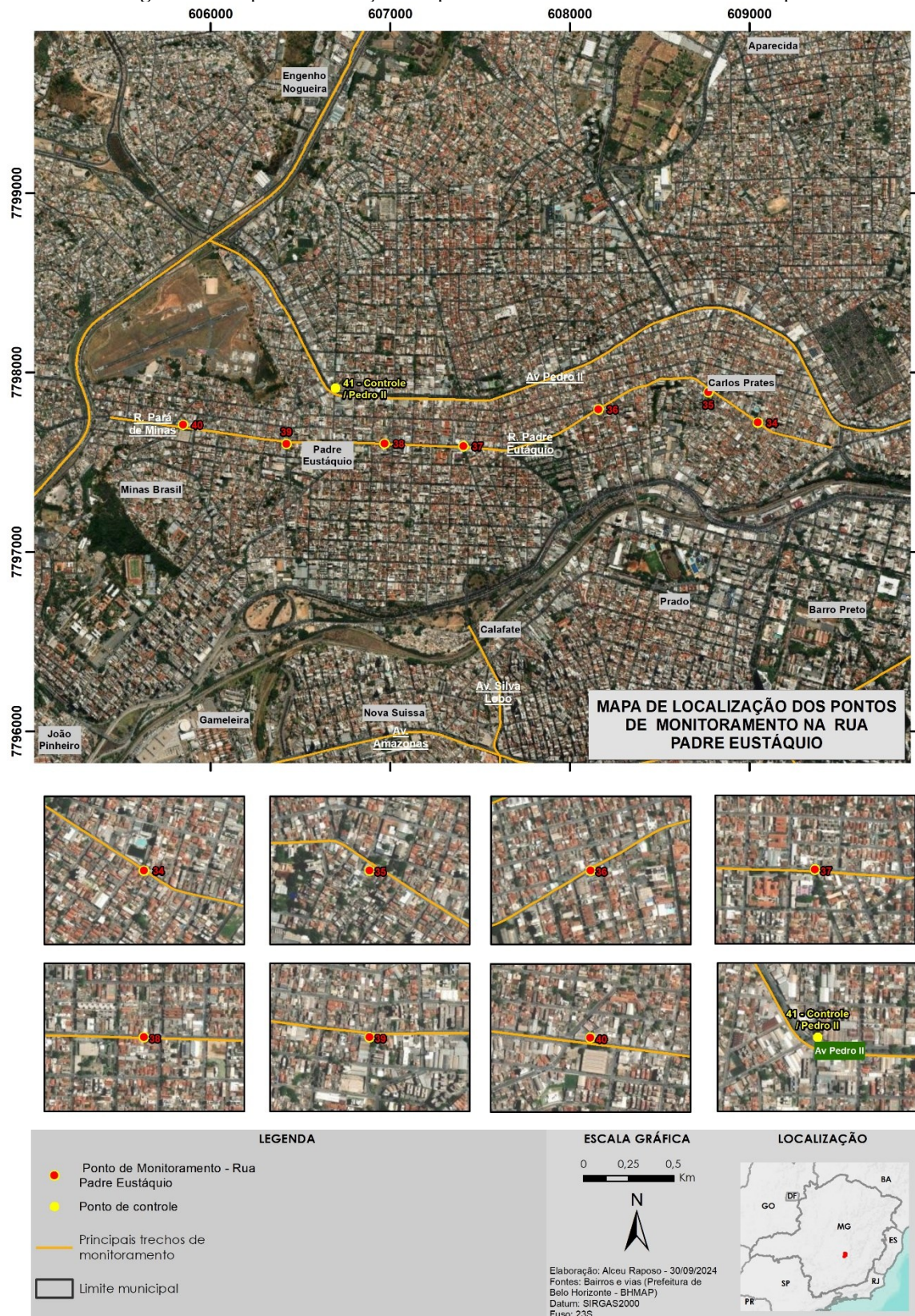


Fonte: Elaborado pelo autor.

A correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$ , com base nos tratamentos estatísticos realizados, foi nula, com  $r=0,35$ , indicando que, para a campanha do período chuvoso, assim como seco, nessa via, não pode ser registrado relações altas entre as duas variáveis.

Registra-se ainda que as condições atmosféricas ao longo do dia 10 de novembro eram de tempo estável, baixa velocidade dos ventos, o que seria propício para uma maior concentração de fato. Por fim, o ponto de controle (Av. Pedro II) registrou valores de  $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando semelhança com os menores valores na rua Padre Eustáquio.

Figura 82: Mapa de localização dos pontos monitorados na Rua Padre Eustáquio

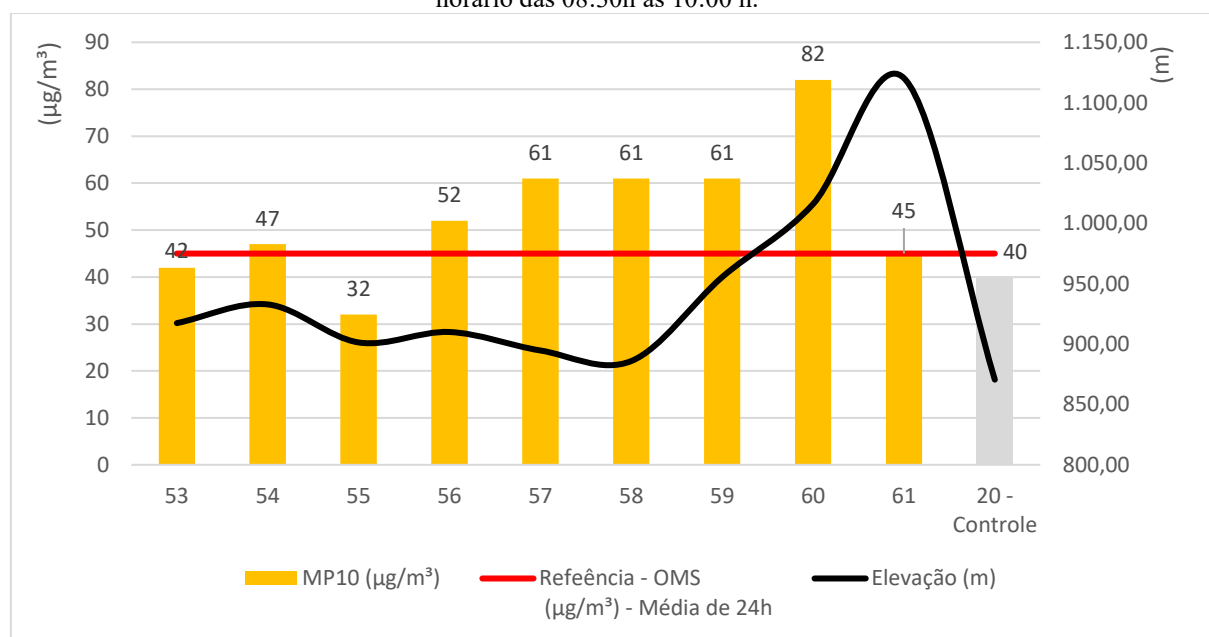


Fonte: Elaborado pelo autor.

As medições no Anel Rodoviário foram realizadas no dia 07 de novembro, assim, como no inverno, o verão registrou concentrações elevadas de  $PM_{10}$  ao longo de praticamente todo o transecto. Como já mencionado, trata-se de uma importante via de escoamento de grande fluxo de Belo Horizonte, ligando as principais BRs que chegam até a capital.

A média registrada para toda a via foi de  $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo o ponto 60 o maior registro de concentração de  $PM_{10}$  com  $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , praticamente no final do anel rodoviário, já quase na saída para o Rio de Janeiro (FIG. 83). Os valores de mínima foram registrados nos pontos de menor elevação topográfica.

**Figura 83:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de campo – Anel Rodoviário – 07 de novembro de 2023- horário das 08:30h às 10:00 h.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Quanto aos dados de correlação entre topografia e concentração de  $PM_{10}$ , com base nos tratamentos estatísticos realizados, foi praticamente nulo, com  $r= 0,22$ , indicando não haver uma correlação considerável entre a topografia e as concentrações de poluente durante o período analisado. O resultado da correlação da altimetria no Anel Rodoviário do ponto de vista da revisão bibliográfica era muito esperado, uma vez que esse transecto é um dos que apresenta maior potencial de verificação desse fenômeno ao sair de valores de 900m para 1.200m ainda dentro de Belo Horizonte, sendo esse cenário não observado com base nos dados apresentados.

**Figura 84:** Mapa de localização dos pontos monitorados no Anel Rodoviário



**MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO NO ANEL RODOVIÁRIO**

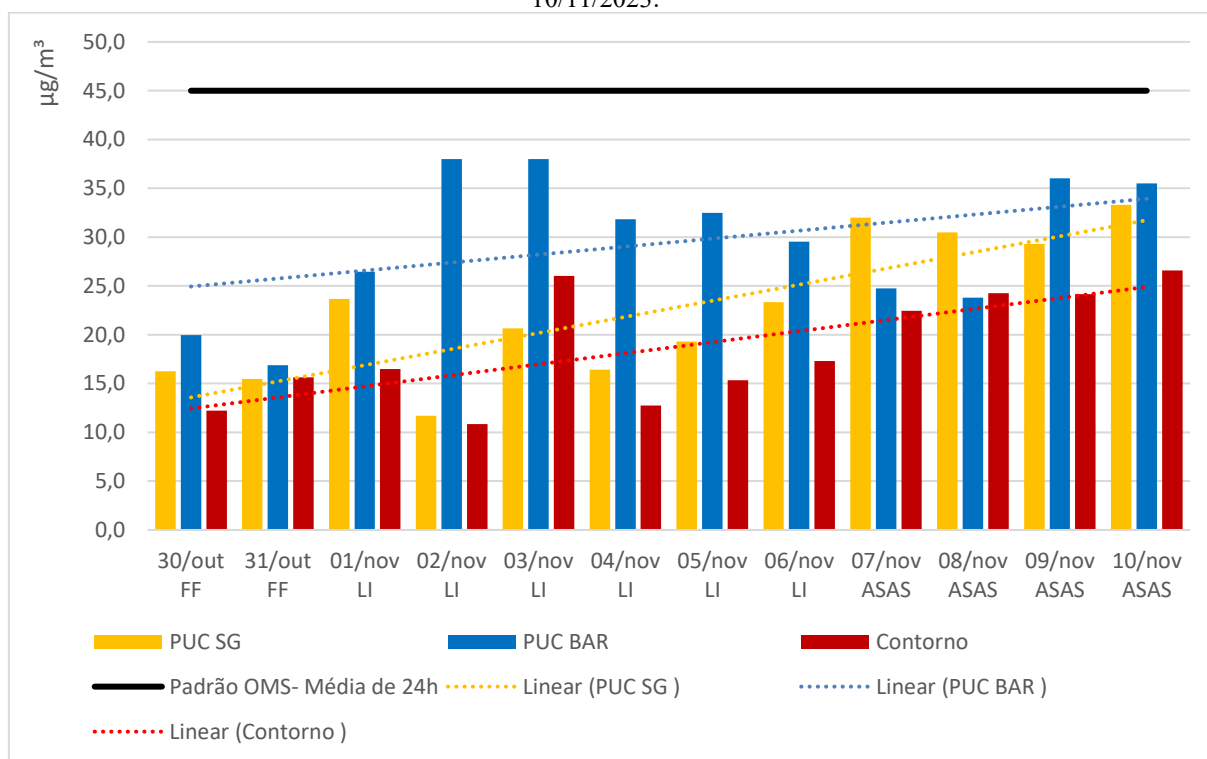
<p><b>LEGENDA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: red;">●</span> Ponto de Monitoramento - Anel Rodoviário</li> <li><span style="color: yellow;">●</span> Ponto de controle</li> <li><span style="color: yellow;">—</span> Principais trechos de monitoramento</li> </ul>	<p><b>ESCALA GRÁFICA</b></p> <p>0 1 2 Km</p> <p>N</p> <p>Elaboração: Alceu Raposo - 30/09/2024          Fontes: Bairros e vias (Prefeitura de Belo Horizonte - BHMAP)          Datum: SIRGAS2000          Fuso: 23S</p>	<p><b>LOCALIZAÇÃO</b></p>
---	---	---------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.3.2 Estações fixas

Os dados estatísticos do período chuvoso (verão) foram bastante diferentes do comportamento das mesmas estações no período seco (inverno), ou seja, cada estação adquiriu um comportamento diferente sobre as concentrações ao longo do tempo. Entretanto, todas as três estações permanecem com uma interação com as condições de tempo registradas em cada período (FIG. 85). As linhas de tendências demonstram que todas as três estações tendem a aumentar as concentrações ao longo do tempo, passando da atuação das LI para a ASAS. Destaca-se ainda a atuação das FF como condições de tempo que indicaram as menores concentrações para o período em análise, indicando que, de fato, são importantes mecanismos de trocas gasosas na atmosfera.

**Figura 85:** Gráfico de resultados dos monitoramentos de PM10 das estações fixas no período de 30/10 a 10/11/2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

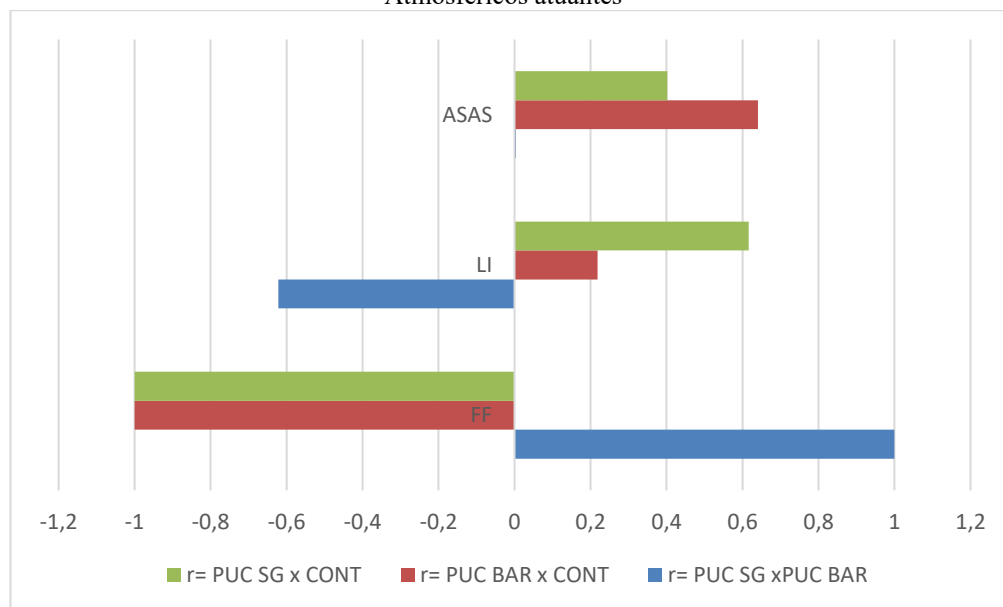
A estação da PUC Barreiro foi a que apresentou as maiores médias de 24 horas, em especial, durante a atuação das LI, com concentrações próximas a 40 µg/m³. Os valores de concentração dessa estação, superiores às demais no período de LI, podem ter relação com as emissões industriais nessa região, que, mesmo em período de instabilidade, sujeitas às trocas

gasosas, mantiveram os níveis mais levados de concentração, dado aos volumes de emissão industrial.

A estação Contorno foi a que, em média, apresentou os menores valores de concentração ao longo do período analisado, ainda que esteja espacialmente dentro do perímetro mais urbanizado do hipercentro de Belo Horizonte, sobre forte influência das emissões veiculares, as trocas gasosas foram mais eficazes do que as emissões neste período.

O gráfico abaixo (FIG. 86) apresenta as correlações do período analisado (30/10/2023 a 10/11/23) entre as três estações fixas. A correlação de Pearson usada nesse caso também avaliou a relação linear entre duas variáveis contínuas. No caso em específico das correlações para o período chuvoso, houve uma importante variação que precisou ser segmentada por condição de tempo para que pudesse ser avaliada. De maneira em geral, o que mais se destacou foram as correlações entre a entrada das FF e o desenvolvimento do ASAS por meio da maior estabilidade atmosférica. A estação Contorno, quando as condições de tempo são propícias para uma maior instabilidade atmosférica, tende a apresentar correlação alta e negativa ( $r=-1$ ) em relação às estações da PUC Barreiro e PUC São Gabriel.

**Figura 86:** Resultados das Correlações de Person para as estações fixa de qualidade do ar x Sistemas Atmosféricos atuantes



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3. Análise Espacial dos Dados

Com base nos dados observados em campo e no tratamento estatístico, foi possível observar alguns aspectos muito importantes sobre a poluição urbana, de modo particular sobre

o material particulado na fração de 10 microns que serão aqui tratadas sob a perspectiva do espaço geográfico.

De modo geral, era de se esperar que as vias que possuem maior fluxo de veículos em circulação seriam as que apresentariam maiores concentrações de  $PM_{10}$ , visto que as medições foram realizadas, pelo método adotado, cerca de 0,5 m de distância das fontes emissoras, veículos automotores. Contudo, os resultados demonstraram que o maior fluxo de veículos sobre as vias não foi fator determinante para configurá-las como as com maiores concentrações de  $PM_{10}$ <sup>27</sup>. Vias como Avenida Amazonas, Anel Rodoviário e Avenida Presidente Antônio Carlos, que são grandes corredores viários de Belo Horizonte, performaram com concentrações elevadas<sup>28</sup>, mas abaixo de vias de fluxo bem menor como Rua Padre Eustáquio e Avenida Silva Lobo/Barão Homem de Melo, tanto no inverno quanto no verão.

A rua Padre Eustáquio chama a atenção por ter o menor tráfego entre as demais vias analisadas e, ao mesmo tempo, a que apresentou as maiores concentrações de poluente, tanto no inverno quanto no verão. A configuração da malha urbana no seu entorno apresenta condições desfavoráveis para troca de ar, como alto adensamento urbano, ainda que dotada de unidades em média de um pavimento, largura da via reduzida, e, especialmente, a baixa velocidade média de deslocamento dadas as condições dela. Nesse sentido, as características da malha como a forma urbana das vias e das edificações do seu entorno (densidade) ajudam a definir as condições de uma via estar mais ou menos sujeita a maiores concentrações de poluição atmosférica.

Analisando as Avenidas Amazonas, Presidente Antônio Carlos e Anel Rodoviário nota-se uma configuração da estrutura dessas vias mais aptas a realizarem trocas de ar entre o sistema local. As faixas de rolagem são mais largas, existe um distanciamento considerável para as edificações e a velocidade média de deslocamento é bem maior que as das demais vias, entre 60 km e 70 km. Os pontos que registraram maiores concentrações de poluentes nessas vias, em geral, foram em setores ao longo do transecto que se apresentavam mais urbanizados, com edifícios altos, o que dificultava a dispersão dos poluentes, bem como os pontos de maior lentidão de tráfego veicular.

---

<sup>27</sup> Importante ressaltar que, apesar de os gráficos apresentarem as médias das medições por via monitorada, esse dado deve ser visto com cautela em função dos dias serem diferentes dos monitoramentos realizados, ainda que dentro de um mesmo sistema atmosférico atuante.

<sup>28</sup> Como mencionado na metodologia, os valores de referência da OMS de 24 horas serviram apenas para fins de comparação relativa (referência qualitativa), uma vez que para ser possível a comparação direta seria necessária a realização do monitoramento por 24 horas.

Estudos importantes, como de Zhou *et al.* (2018), também chegaram resultados parecidos ao indicarem que, em Pequim, Tianjin, Xangai, Chongqing e Cantão (entre 2000 e 2012), a correlação positiva entre o desenvolvimento urbano irregular (geometria das áreas urbanas complexas) e a proporção de dias com o IQA<sup>29</sup> maior que 100 no ano, o que sugere que uma composição urbana irregular leva ao aumento de congestionamento veicular, caracterizado por baixas velocidades e viagens longas de veículos que causam mais emissões de poluentes atmosféricos e de deterioração da qualidade do ar.

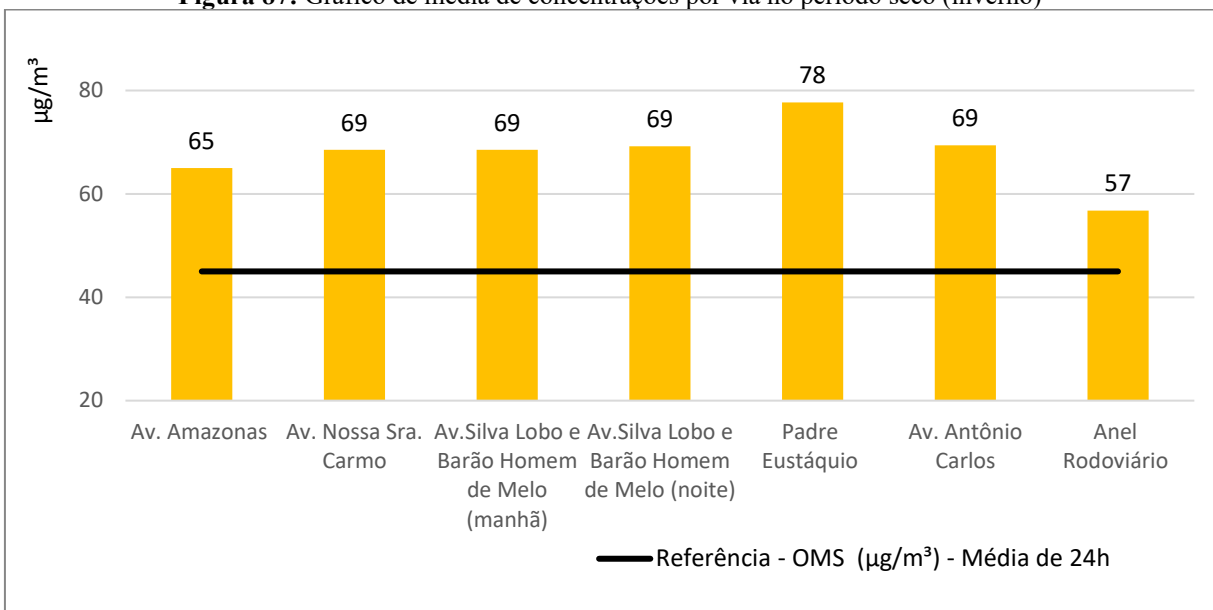
Observando as figuras 70 e 71, é possível considerar que, durante a estação seca (inverno), dadas às condições de maior estabilidade da atmosfera que o comportamento das concentrações de poluentes das vias, ainda que medidos em dias diferentes, foram praticamente dentro da mesma faixa, entorno de  $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando, assim, que, apesar das condições diversas de tráfego, adensamento, velocidade média, altura das edificações, a atmosfera estava comprometida igualmente dentro de uma mesma faixa de poluição, o que, na prática, homogeneizava o espaço urbano em função da atuação do clima local. Importante ressaltar que isso não significa que as diferenças locais relacionadas aos topoclimas não foram observadas, como apontou as discussões dos capítulos anteriores que se debruçaram sobre a escala de maior detalhe.

Durante a estação chuvosa (verão), as condições topoclimáticas ganham maior força em função do clima local. Desse modo, as condições adensamento urbano, capacidade de troca de ar com os ambientes externos, largura das faixas de rolamento, proximidade das edificações e velocidade de fluxo se tornam elementos mais definidores das condições da qualidade do ar das vias. Isso porque a instabilidade da atmosfera, de modo em geral, possui maior eficiência nas trocas gasosas (camada de mistura mais eficiente), deixando apenas um residual que se “particulariza” em cada via mediante suas condições estruturais. Nesse âmbito, tem-se, por exemplo, uma levada média de concentração de particulado em vias de menor expressão como Avenida Barão Homem de Melo/Silva Lobo e Rua Padre Eustáquio com concentrações de  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Enquanto vias de grande circulação como Avenida Nossa Senhora do Carmo e Avenida Presidente Antônio Carlos com médias de  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente (FIG 87 e 88).

---

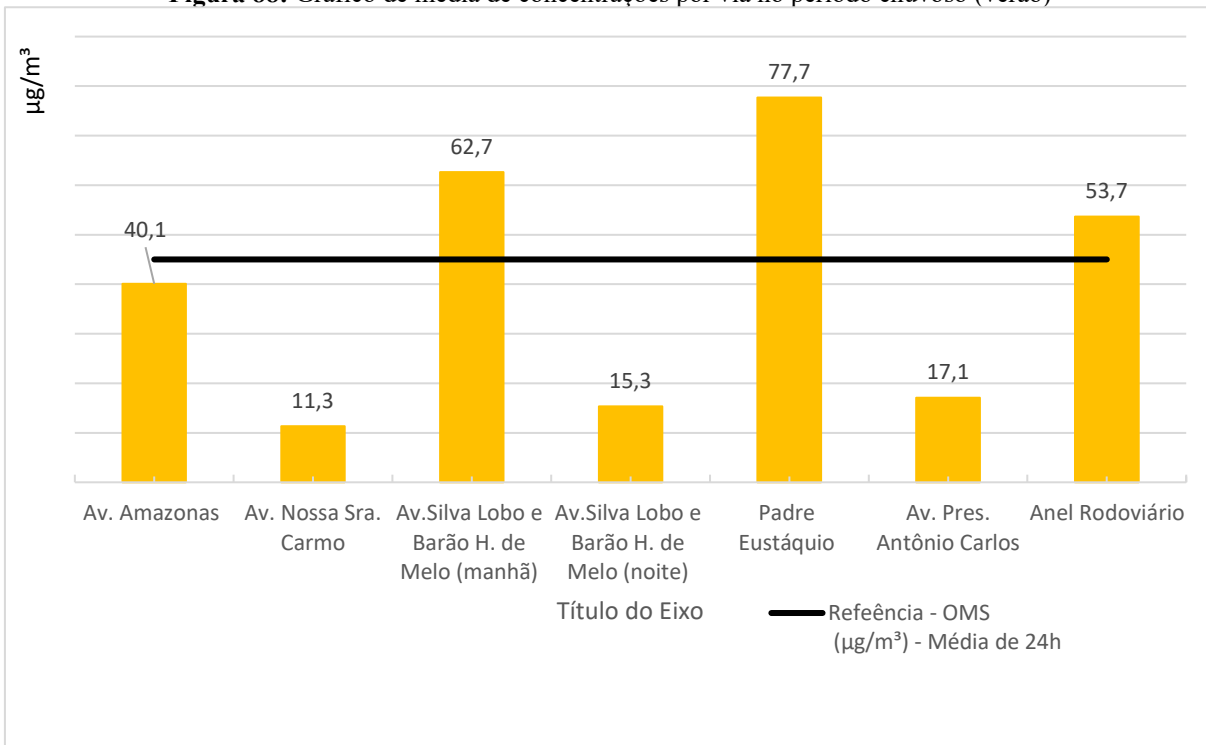
<sup>29</sup> Índice de Qualidade do Ar. Geralmente é utilizado pelos órgãos ambientais para informar a população das condições diárias da qualidade do ar. De maneira em geral é representado por um valor numérico adimensional calculado a partir de funções lineares descontínuas em cinco faixas de valores que varia de zero a  $\geq 200$ .

**Figura 87:** Gráfico de média de concentrações por via no período seco (inverno)



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 88:** Gráfico de média de concentrações por via no período chuvoso (verão)



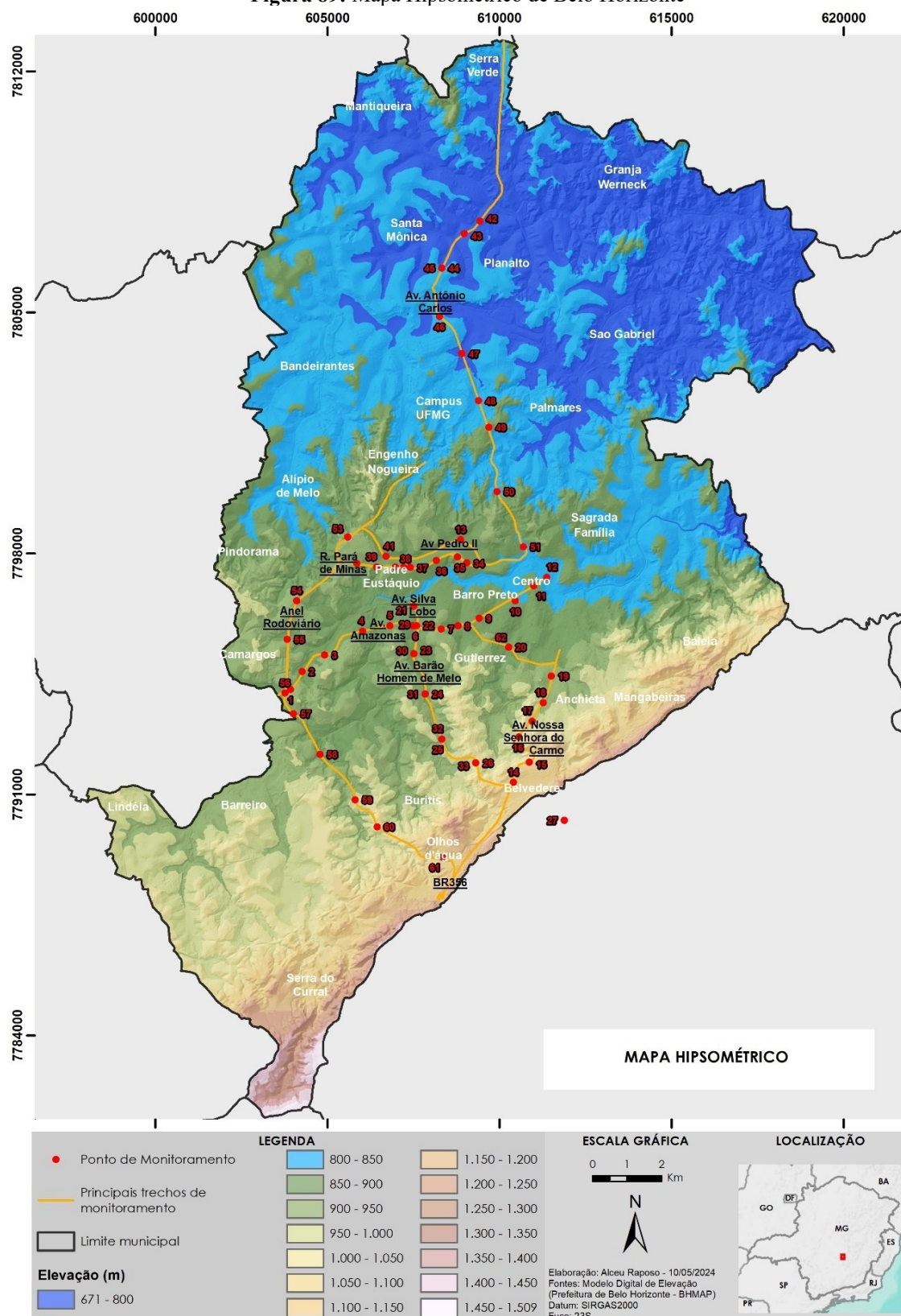
Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma outra importante constatação foi quanto às possíveis diferenças de concentrações entre o período noturno e diurno. Nesse aspecto, a via selecionada para se avaliar essas condições foi a Avenida Barão Homem de Melo/Silva Lobo, nas quais foram realizadas, nos mesmos dias, medições tanto diurnas quanto noturnas. Os dados dos gráficos analisados demonstram que, para o período de inverno, não houve diferenças entre as concentrações diurnas

e noturnas, com registro de  $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Contudo, durante o verão, o resultado foi bem diferente, com concentrações de  $\text{PM}_{10}$  durante o dia de  $62,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e a noite  $15,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Diante desse cenário, é possível constatar que, para o período de inverno, como já mencionado, dada à saturação da atmosfera em escala no nível de clima local, não houve diferença entre o período diurno e noturno, uma vez que, apesar das menores emissões veiculares durante a noite, a atmosfera ainda permaneceu saturada, sem condições de trocas gasosas dada à baixa eficiência da camada de mistura. Já durante o verão, a instabilidade atmosférica permitiu uma atuação diferente em relação ao dia e à noite, impondo, assim, que as condições de topoclima se manifestem de forma mais preeminente, quando se diminui as emissões veiculares noturnas, atua, de forma mais eficiente, as trocas gasosas entre o ambiente urbano e a atmosfera.

O mapa hipsométrico de Belo Horizonte (FIG. 89), conjugado com os dados estatísticos apresentados nos gráficos, demonstram que durante a estação seca (inverno), as concentrações de poluentes estiveram estratificadas em todas as classes de elevação, indicando mais uma vez que a estabilidade da atmosfera homogeneiza no tecido urbano a poluição em diferentes cotas altimétricas. Nessa perspectiva, foi possível constatar que, embora vários pontos de monitoramento se apresentaram em cotas altimétricas elevadas, acima de 1000 m, não obtiveram resultados de qualidade do ar melhor que pontos de menor elevação, indicando, assim, que mesmo que a morfologia de Belo Horizonte tenha padrões geomorfológicos com grandes elevações, não são suficientes para mitigar os efeitos da poluição urbana nessas áreas (Belvedere, Barreiro, Buritis, Serra, Sion etc.). Durante o verão, as relações escalares também tomam outras dimensões no nível de topoclima, ou seja, faixas de cotas altimétricas também não se mostram como determinantes para definição de regiões ou zonas de poluição por condição topográfica do terreno. Como já mencionado, mostra-se como mais determinante as condições de adensamento urbano, a capacidade de troca de ar com os ambientes externos, a largura das faixas de rolamento, a proximidade das edificações e a velocidade de fluxo, ou seja, quanto maior a irregularidade do adensamento urbano, mais susceptível para uma piora da qualidade do ar (Padre Eustáquio, Calafate, Prado, Bomfim, Lagoinha, Ipiranga etc.).

Figura 89: Mapa Hipsométrico de Belo Horizonte



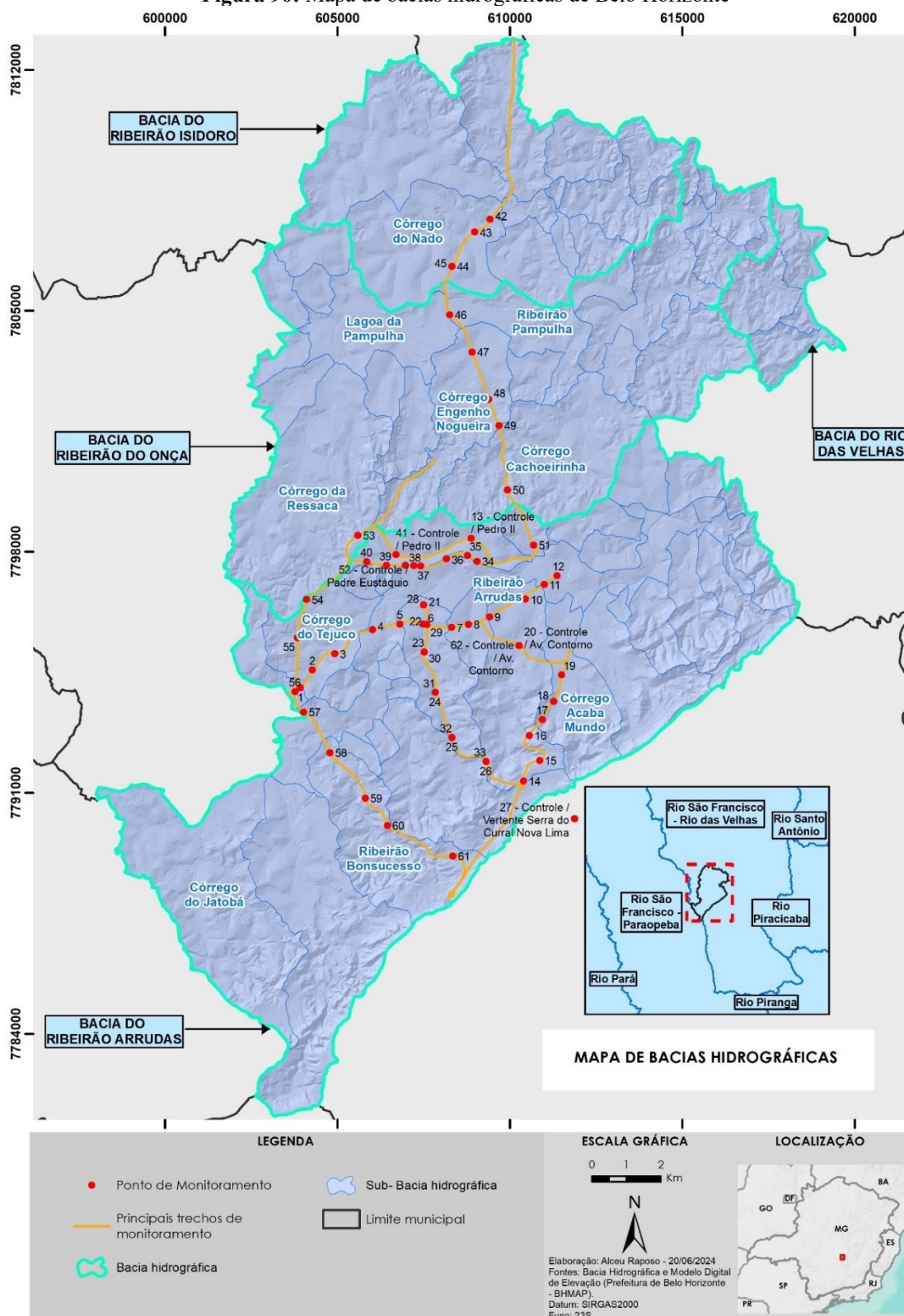
Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra análise espacial realizada foi quanto à relação da poluição atmosférica com as microbacias de Belo Horizonte, porque algumas referências bibliográficas dedicadas à temática

tratam das bacias atmosféricas como unidade espacial de análise. Nesse sentido, é esperado que, para se fazer uma alusão às bacias hidrográficas, deveria ter, ao menos, alguma relação com as estas, ainda que do ponto de vista teórico do conceito de bacia. Como já mencionado na revisão bibliográfica, a definição de bacia hidrográfica perpassa por um sistema com entrada e saída de energia espacialmente bem definidos por elementos morfodinâmicos.

No mapa apresentado abaixo (FIG.90), as microbacias de Belo Horizonte (Ribeirão Arrudas, Rio das Velhas, Ribeirão Isidoro e Ribeirão do Onça) se mostram pouco eficazes para explicar a dinâmica de entrada e saída (*input e output*) de material (poluição atmosférica). De acordo com algumas literaturas, especialmente aquelas utilizando o conceito de bacias atmosféricas, era de se esperar que os pontos mais altos da bacia do Ribeirão Arrudas e do Rio das Velhas teriam condições de qualidade do ar diferenciadas das demais áreas da bacia (média e baixa vertente), o que não aconteceu. Era de se esperar que próximo às drenagens a qualidade do ar seria melhor em função da disponibilidade de água na atmosfera, contudo este elemento natural não é mais possível ser identificado em função da urbanização dos cursos d'água e do seu tamponamento. Outro importante resultado dessa relação entre bacias foi a realização de um ponto controle, localizado atrás da Serra do Curral no município de Nova Lima (bacia Rio Águas Claras), com intuito de correlacionar com os valores medidos nas bacias de Belo Horizonte. Os resultados apontaram que, para o período de seca (inverno), as concentrações praticamente foram as mesmas de uma bacia para a outra, indicando que a estratificação da poluição na atmosférica perpassa os limites da Serra do Curral, ultrapassa os limites da bacia e ganha contornos que têm mais a ver com uma espécie de bolsão de poluição, o qual, na maioria das vezes, não possui limite geográfico definido e amorfas.

Figura 90: Mapa de bacias hidrográficas de Belo Horizonte



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra análise espacial realizada foi quanto à relação da poluição atmosférica com a densidade demográfica de Belo Horizonte, visto que algumas referências bibliográficas, como Baklanov *et al.* (2016); Pelaez *et al.* (2020); Riojas-Rodríguez *et al.* (2016); Zhu *et al.* (2020),

dedicam a temática e indicam relações entre essas variáveis. A tabela 13 e os mapas das Figuras 91 e 92 sintetizam os dados de geoprocessamento e auxiliam no entendimento para explicar o fenômeno entre adensamento urbano e qualidade do ar.

Em síntese, é possível perceber que, durante a estação seca (inverno), o fenômeno da poluição sobre Belo Horizonte, já identificado acima, possui grande extensão geográfica e cobre, praticamente, todas as regiões com concentrações elevadas de poluição. Entretanto, é possível observar que, de fato, as regiões com maior adensamento urbano, de maneira em geral, registraram as maiores concentrações (*hotspots*). Contudo, dada à dinâmica espacial da camada de poluição no verão, predomina o fenômeno de *bolsões de poluição*, fenômeno este que será conceituado a seguir.

Durante o período chuvoso, a relação entre adensamento urbano e poluição atmosférica, (Tabela 13), indicou, na maioria dos casos, a formação de *hotspots de poluição* (fenômeno a ser conceituado a seguir). Estes fenômenos localizaram-se basicamente nas regiões de maior adensamento urbano, sugerindo que, durante o período chuvoso, o fenômeno de “limpeza da atmosfera”, proporcionado pela precipitação ou umidade elevada do ar, se dá de forma mais eficiente nas áreas menos adensadas, restando, para as áreas mais adensadas, concentrações em que as trocas gasosas são menos efetivas.

**Tabela 13:** Bolsões e *Hotspots* de poluição em Belo Horizonte durante o inverno e verão

Ponto	Inverno			Verão		
	MP <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Densidade	Bolsões	MP <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Densidade	<i>Hotspots</i>
1	72	4		84	4	
2	64	1		23	1	
3	64	2		26	2	
4	64	1		28	1	
5	66	3		38	3	
6	65	3		32	3	
7	63	3		86	3	
8	64	3		21	3	
9	63	3		83	3	
10	64	2		19	2	
11	66	2		20	2	
12	65	2		21	2	
13	67	3		18	3	
14	71	1		13	1	
15	70	1		7	1	
16	69	1		13	1	
17	67	4		13	4	
18	67	3		11	3	
19	67	3		11	3	
20	66	3		18	3	
21/28	72	4		77	4	
22/29	69	3		71	3	
23/30	68	3		52	3	
24/31	68	4		60	4	
25/32	68	1		74	1	
26/33	66	1		42	1	
27	70	1		26	1	
34	86	2		98	2	
35	82	4		81	2	
36	76	4		43	4	
37	73	2		44	2	
38	80	3		104	3	
39	73	3		48	3	
40	74	3		60	3	
41	76	3		47	3	
42	73	2		11	2	
43	72	2		20	2	
44	71	2		23	2	
45	71	2		12	2	
46	70	1		24	1	
47	69	3		14	3	

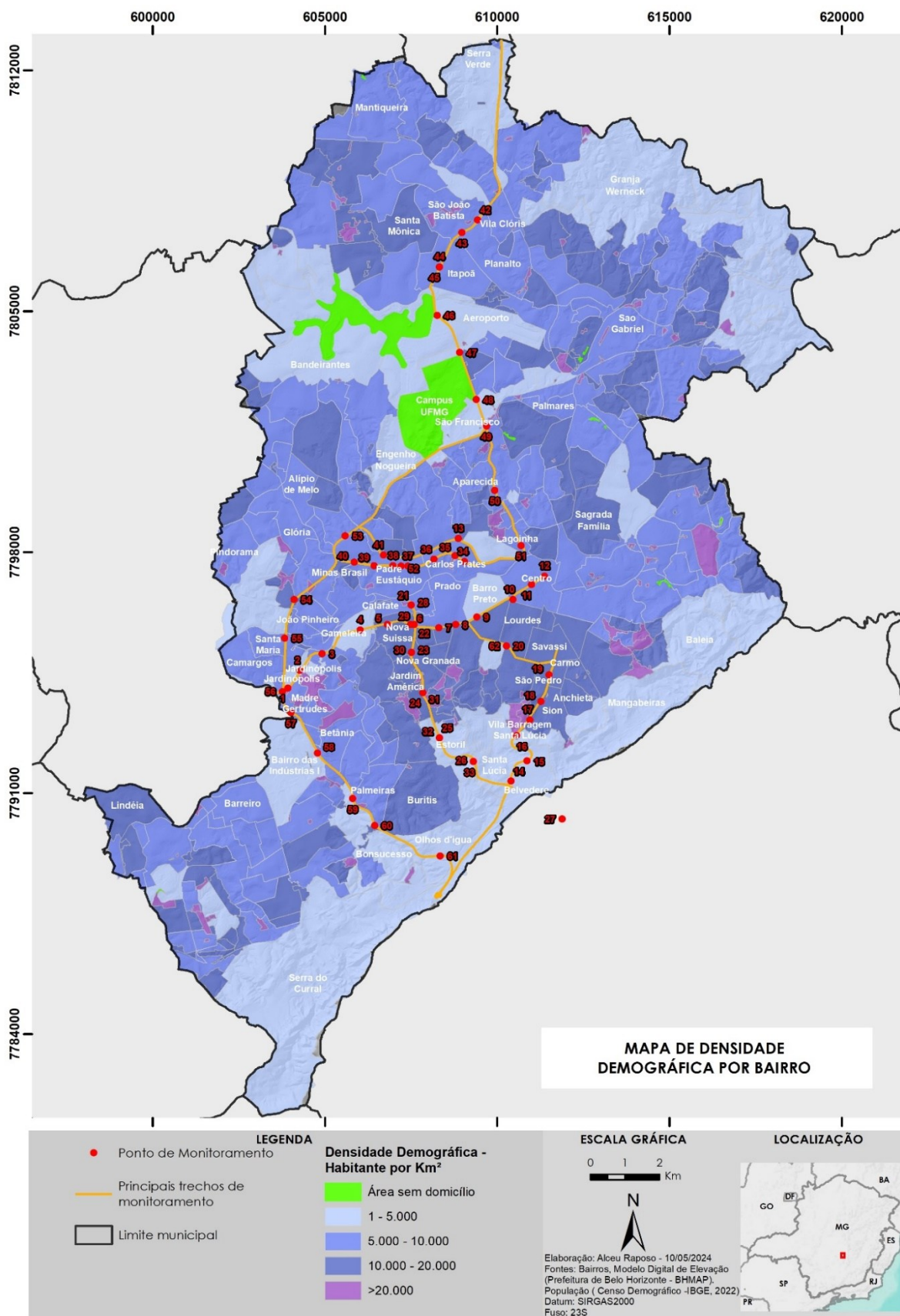
Ponto	Inverno			Verão		
	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Densidade	Bolsões	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Densidade	Hotspots
48	70	1		7	1	
49	66	4		12	4	
50	66	2		16	2	
51	66	2		32	2	
52	66	2		11	2	
53	10	2		42	2	
54	190	3		47	3	
55	91	2		32	2	
56	43	2		52	2	
57	61	2		61	2	
58	20	1		61	1	
59	49	1		61	1	
60	28	1		82	1	
61	19	1		45	1	

### Legenda

Densidade demográfica	Classificação	
1-5.000	1	Baixa
5.000 – 10.000	2	Média
10.000 – 20.000	3	Alta
>20.000	4	Muito Alta

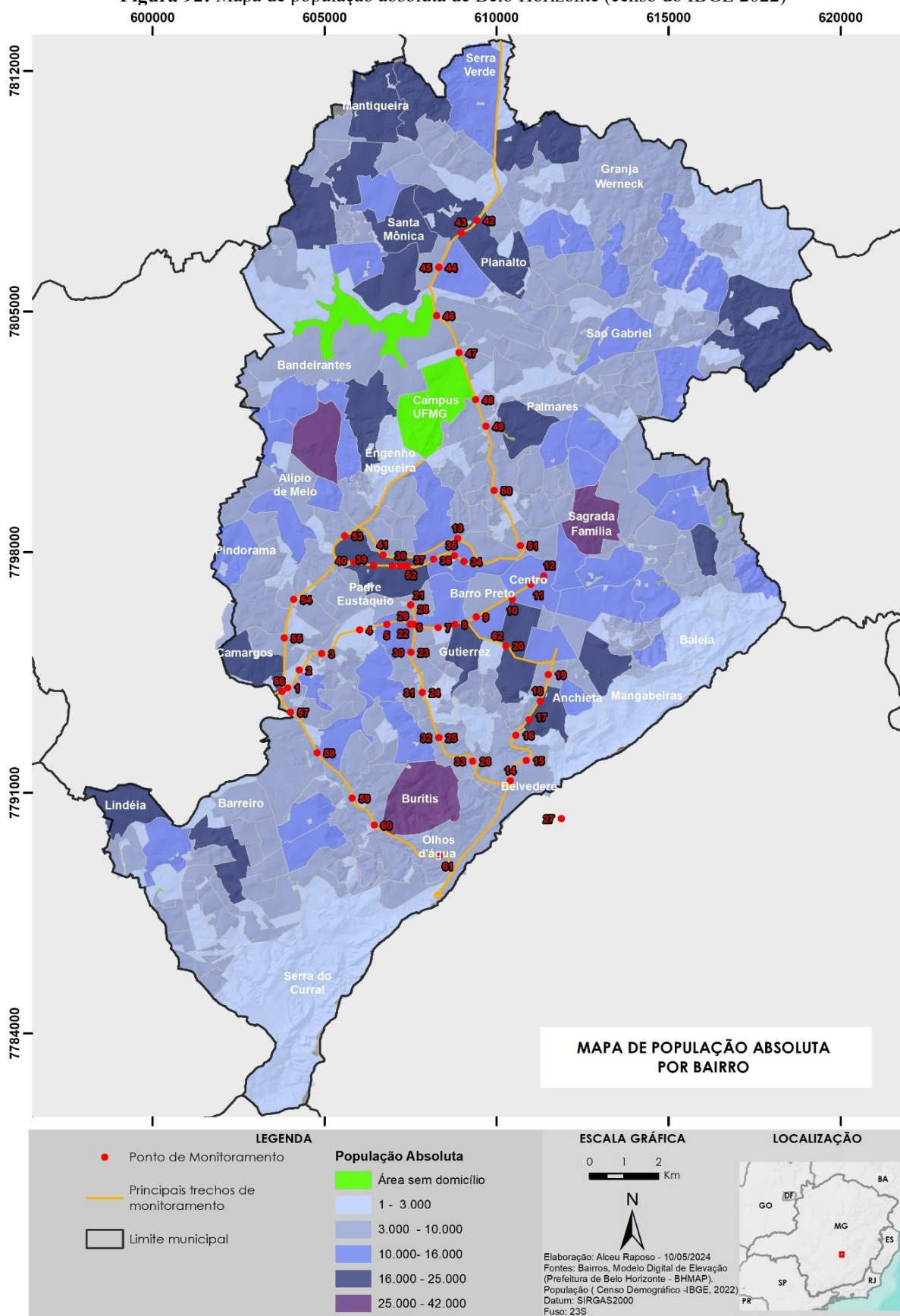
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 91: Mapa de Densidade demográfica de Belo Horizonte (censo do IBGE 2022)



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 92:** Mapa de população absoluta de Belo Horizonte (censo do IBGE 2022)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando como base o conceito de "bolsões" nas ciências naturais, o qual refere-se a regiões ou a áreas isoladas dentro de um sistema maior em que certas condições, propriedades ou características são diferentes ou mais pronunciadas em comparação ao entorno. Esses bolsões podem ser físicos, como em geologia, química, climatologia e biologia, ou mais abstratos, como em ecologia e sociologia. Assim, os bolsões representam uma heterogeneidade dentro de um sistema, no qual processos ou condições específicas resultam em características particulares que se destacam em relação ao entorno imediato, exemplos:

•**Geologia:** em um corpo rochoso, bolsões de minerais específicos podem se formar em áreas nas quais as condições de temperatura, pressão e composição química favorecem a cristalização desses minerais.

•**Ecologia:** bolsões de biodiversidade são áreas nas quais a diversidade de espécies é significativamente maior do que nas regiões ao redor. Esses bolsões podem surgir devido a microclimas, a variações no solo ou a outras condições ambientais que favorecem a sobrevivência de diferentes espécies.

•**Climatologia:** em grandes massas de ar podem existir bolsões de ar quente ou frio que se formam devido a variações locais na temperatura, à umidade ou à pressão atmosférica. Esses bolsões podem influenciar o clima local de uma região.

•**Hidrologia:** Em sistemas de águas subterrâneas, bolsões de água com características químicas ou temperaturas distintas podem ser encontrados, formando aquíferos isolados com propriedades únicas.

Já o conceito de "*hotspots*" (ou "pontos quentes", em português) é usado em várias áreas das ciências naturais para descrever regiões ou áreas em que determinados fenômenos ocorrem com maior intensidade ou frequência em comparação ao entorno. O termo é amplamente empregado em disciplinas como ecologia, geologia, climatologia, e biologia evolutiva, cada uma com seu contexto específico. Em resumo, "*hotspots*" são áreas de particular interesse em várias disciplinas das ciências naturais por sua concentração ou intensidade excepcional de fenômenos, sejam eles biológicos, geológicos ou climáticos.

**Hotspots de Biodiversidade:** são regiões que abrigam uma alta concentração de espécies endêmicas (espécies que não são encontradas em nenhum outro lugar) e que, ao mesmo tempo, estão sob grave ameaça de destruição ou degradação. Conservacionistas identificam esses *hotspots* para priorizar esforços de proteção. Exemplos incluem a Mata Atlântica no Brasil e as Ilhas Galápagos.

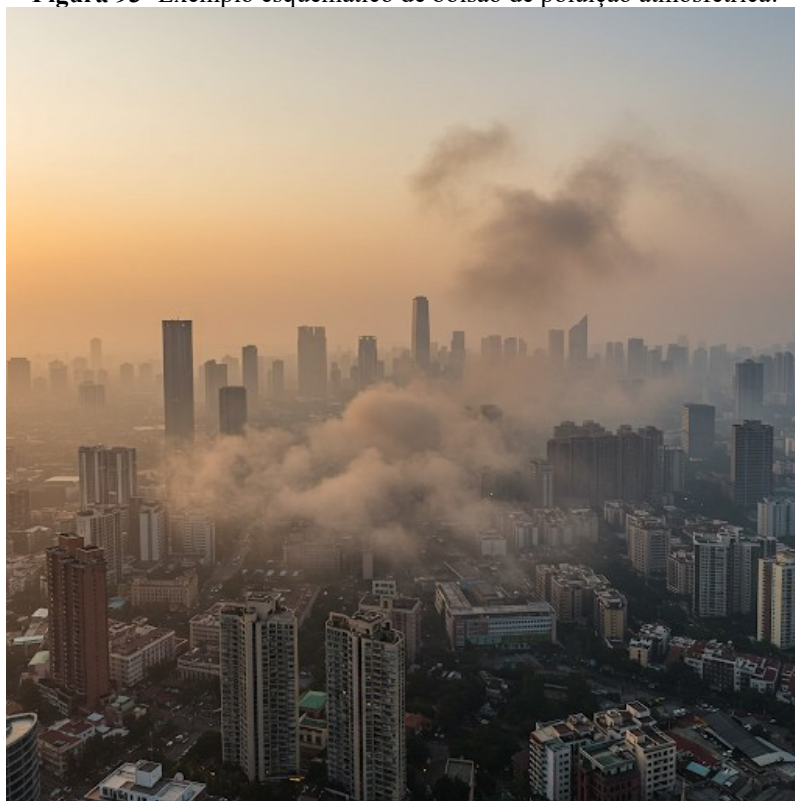
**Hotspots Magmáticos:** refere-se a locais na crosta terrestre nos quais plumas de magma sobem das profundezas do manto para a superfície, causando atividade vulcânica intensa. Diferente das zonas de subducção em que vulcões se formam devido à interação entre placas tectônicas, os *hotspots* magmáticos ocorrem no interior das placas tectônicas. Um exemplo famoso é o arquipélago do Havaí.

**Hotspots Climáticos:** são áreas que experimentam mudanças climáticas mais intensas ou rápidas em comparação ao restante do planeta. Esses *hotspots* são importantes para o estudo do impacto das mudanças climáticas e para o desenvolvimento de estratégias de adaptação.

**Hotspots de Evolução:** regiões nas quais ocorre uma rápida diversificação e evolução de espécies, frequentemente associadas a ambientes dinâmicos ou isolados, como ilhas. Esses locais são laboratórios naturais para o estudo dos processos evolutivos.

É dentro desse entendimento que a presente pesquisa sugere que, em Belo Horizonte, o conceito que melhor representa o fenômeno da poluição urbana se dá pela formação de um ***bolsão de poluição*** no inverno e pequenos núcleos de poluição no verão denominados de ***hotspot de poluição***.

**Figura 93** -Exemplo esquemático de bolsão de poluição atmosférica.



**Fonte:** Elaborado por IA Gemini 2.0 a partir de comandos e informações técnicas do autor.

**Figura 94** - Exemplo esquemático de *hotspots* de poluição.



**Fonte:** Elaborado por IA Gemini 2.0 a partir de comandos e informações técnicas do autor.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, faz-se importante mencionar que a metodologia concebida para a realização da presente pesquisa se mostrou bastante satisfatória e muito prática durante sua execução em campo, sem muitas ferramentas que pudessem trazer um grau de complexidade na sua execução. Nesse quesito, a utilização do método proporciona, de forma livre, sua utilização por diversos seguimentos da sociedade e não apenas o meio acadêmico, tais como agentes de planejamento urbano, estudantes de graduação e pós-graduação, consultorias ambientais, prefeituras e demais interessados.

O uso de estações de qualidade do ar móveis também se mostrou bastante eficiente em detrimento das estações de qualidade do ar fixas, que, por sua vez, mostram-se impraticáveis financeiramente mediante o alto custo operacional, ainda mais em um país como o Brasil, carente de recursos financeiros no setor público. O resultado positivo foi ao encontro de um dos objetivos específicos desta pesquisa, que era realizar o monitoramento da qualidade do ar (material particulado) com o uso de estações automáticas móveis em vários pontos pré-definidos nas principais vias de circulação da cidade de Belo Horizonte.

O uso de uma estação automática confiável com padrões rigorosos de sensores de coleta e de análise de partículas se mostrou, de fato, uma boa solução para pesquisas acadêmicas e para o planejamento urbano. Estações automáticas, como a *DustTrak*, já são uma realidade em vários países da Europa e nos EUA, sendo utilizada como ferramenta de controle ambiental no Brasil em capitais como Salvador, por exemplo. Esse tipo de estação pode ser utilizado pelo poder público e pela iniciativa privada para monitoramento de eventos pontuais como frentes de obras, locais de maior reclamação, eventos de grandes públicos, proximidades de hospitais, escolas, casas de repouso, parques verdes e demais pontos sensíveis.

Os dados de campo mostraram que existe uma diferença bastante significativa na qualidade do ar em Belo Horizonte durante o período de seca (inverno) e o verão (chuvoso). De acordo com os levantamentos, durante a estação seca, utilizando a estação móvel, praticamente em todos os pontos monitorados, a qualidade do ar identificada se mostrou bem elevada e acima dos limites recomendáveis pela Organização Mundial de Saúde (OMS), ainda que o período analisado tenha sido de 10 minutos em cada ponto e não a média de 24 horas padrão, trata-se de valores médios que merecem a devida atenção. A chuva, conforme as referências bibliográficas estudadas (Zhang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020<sup>a</sup>; Sánchez-Ccoyllo e Andrade, 2002), funciona como fenômeno meteórico capaz de lavar a atmosfera de forma bastante eficiente. Durante os monitoramentos realizados, essa eficiência pode ser claramente

percebida, mas não suficientemente capaz de deixar todas as vias de Belo Horizonte com uma boa qualidade do ar para aquele período. Apenas a Av. Nossa Senhora do Carmo e Av. Presidente Antônio Carlos registraram valores em todos os pontos medidos abaixo do valor de referência, o que direciona para o fato de que vias ou porções urbanas dotadas de maior planejamento urbano possuem, de fato, maior resiliência sobre os fenômenos de poluição urbana.

Levando ainda em consideração os fenômenos meteorológicos, foi possível observar que a qualidade do ar em Belo Horizonte, durante o inverno, possui uma maior distribuição geográfica, caracterizando-se como uma espessa camada de poluição sobre grande parte da região metropolitana e, de certa forma, homogeneizando a poluição sobre o território. Esse fenômeno pode ser observado no ponto controle cujos valores estiveram muito próximos dos pontos monitorados. Em outras palavras, os valores médios das vias monitoradas tiveram pouca diferença dos pontos geograficamente distantes, indicando que o comportamento atmosférico, durante longos períodos de estabilidade atmosférica, tende a concentrar a poluição em porções atmosféricas igualmente distribuídas.

Durante o verão, as instabilidades atmosféricas exercem boa influência sobre a poluição atmosférica, realizando importantes trocas gasosas e renovando o ar limpo sobre a superfície de Belo Horizonte. Nesse cenário, no verão, as concentrações de poluição diminuem sobre as regiões mais planejadas, Av. Nossa Senhora do Carmo, por exemplo, e de menor efeito sobre a porções mais adensadas, rua Padre Eustáquio, por exemplo.

Diante dos resultados apresentados, a pesquisa logrou êxito a atender ao segundo objetivo específico que era de realizar o monitoramento da qualidade do ar em duas campanhas (seca e chuva), visando avaliar possíveis interferências dos fenômenos meteorológicos sobre as condições da qualidade do ar.

Vias como a rua Padre Eustáquio, por exemplo, chamaram a atenção por ter o menor fluxo de tráfego entre as demais vias analisadas e, ao mesmo tempo, apresentou as maiores concentrações de poluente, tanto no inverno quanto no verão. Esse fenômeno pode ter explicações pela configuração das condições da malha urbana e adensamento, que propiciaram condições desfavoráveis para troca de ar. A pesquisa indicou que a relação de menor largura das vias, alta densidade urbana e a baixa velocidade média de deslocamento dos veículos mostraram-se elementos fundamentais para uma piora na qualidade do ar.

Os resultados apresentados nas vias Av. Amazonas, Av. Presidente Antônio Carlos e Anel Rodoviário apresentaram uma configuração urbana de vias mais aptas a realizarem trocas de ar com o ambiente, tais como faixas de rolagem mais largas, distanciamento entre as

edificações e velocidade média de deslocamento entre 60 km e 70 km em dias de tráfego sem acidentes ou engarrafamentos mais graves. Tais condições foram consideradas como elementos importantes para que a qualidade do ar dessas vias não fosse ainda mais degradada, levando em consideração o alto número de veículos leves e pesados que circulam diariamente sobre essas importantes vias de ligação da capital.

Assim, um inventário de emissões sobre vias pode não representar a qualidade do ar *in loco* em estudo futuros, dado às condições de circulação do ar e às condições de confinamento, adensamento urbano, velocidade média de circulação e demais características geográficas e climatológica da região.

Nesse cenário, a pesquisa apresentou resultados parecidos como os estudos realizados por Zhou *et al.* (2018), que indicaram, nas cidades Pequim, Tianjin, Xangai, Chongqing e Cantão (entre 2000 e 2012), a correlação positiva entre o desenvolvimento urbano irregular (geometria das áreas urbanas complexas), sugerindo que uma composição urbana adensada ou pouco planejada leva ao aumento de congestionamento veicular, caracterizado por baixas velocidades e viagens longas de veículos que causam mais emissões de poluentes atmosféricos e deterioração da qualidade do ar.

A questão topografia também foi avaliada na pesquisa e os resultados indicaram que, durante o inverno, as concentrações de poluentes estiveram igualmente presentes em todas as classes de elevação, indicando, mais uma vez, que a estabilidade da atmosfera homogeneiza a poluição em diferentes cotas altimétricas sobre tecido urbano de Belo Horizonte, acima de 1000 m, não obtiveram resultados de uma melhora na qualidade do ar, indicando, assim, que mesmo que a morfologia de Belo Horizonte tenha padrões geomorfológicos com grandes elevações, essas não são suficientes para mitigar os efeitos da poluição urbana como nas regiões do Belvedere, Barreiro, Buritis, Serra, Sion etc.

Durante o verão, as relações escalares também tomam outras dimensões no nível de topoclima, ou seja, faixas de cotas altimétricas também não se mostram como determinantes para definição de regiões ou zonas de poluição por condição topográfica do terreno. Como já mencionado, mostra-se como mais determinante as condições de adensamento urbano, a capacidade de troca de ar com os ambientes externos, a largura das faixas de rolamento, as proximidades das edificações e velocidade de fluxo, ou seja, quanto maior a irregularidade do adensamento urbano mais susceptível a uma piora da qualidade do ar, tais como Padre Eustáquio, Calafate, Prado, Bonfim, Lagoinha, Ipiranga etc.

Diante desse cenário, o terceiro objetivo da pesquisa se cumpriu ao buscar entender a dinâmica do fenômeno da poluição em Belo Horizonte e suas relações entre a topografia, o clima, a geometria das vias e a densidade da circulação veicular.

Por fim, este trabalho se ateve a identificar e a avaliar a existência de bacias atmosféricas ou bolsões de poluição na cidade de Belo Horizonte. Assim, a pesquisa indicou que tanto as *Ilhas de Calor* quanto as *Bacias Aéreas* não devem ser tratadas como elementos fisiográficos ou ferramentas terminológicas definidoras de porções espaciais em que se concentram determinada carga poluidora, visto que as interações dos sistemas e a capacidade de troca entre os elementos internos e externos foram exaustivamente discutidos ao longo do capítulo de referencial (sistema aberto).

As Bacias Áreas, em especial, fazem uma alusão à terminologia de origem da hidrografia, bacias hidrográficas. Nesse sentido, para que pudessem ter, de fato, mecanismos semelhantes, é necessário importantes elementos comparativos os quais as Bacias Áreas não dispõem enquanto sistema natural, tais como sistema dotado de entrada e saída de energia bem definido (input e output), montante e exultório, que é naturalmente separado por unidades de relevo de forma bem definida em que a água meteórica obedece aos critérios morfológicos. Enfim, a atmosfera, ao ser compartimentada na forma de bacia, perde muito dos elementos de sistema aberto, caótico e dinâmico como preconizado por diversos autores do campo da climatologia.

É dentro desse entendimento que a presente pesquisa sugere que, em Belo Horizonte, o conceito que melhor representa o fenômeno da poluição urbana se dá pela formação de dois fenômenos distintos na capital durante o ano, em que, no inverno, a formação de **bolsão de poluição** se faz mais representativa e, durante o verão, a atuação de pequenos núcleos denominados de **hotspot de poluição** são mais evidentes. Suspeita-se ainda que, no caso dos **hotspot de poluição**, o fenômeno seja móvel e variável, a depender da atuação das condições climáticas locais, bem como da dinâmica das emissões atmosféricas provenientes das condições de circulação de cada via.

Finalizando, espera-se que esta pesquisa tenha trazido resultados práticos na questão do planejamento urbano, não só para Belo Horizonte, mas para outras cidades que estejam preocupadas e atentas às questões da poluição urbana como um fenômeno deletério à saúde humana, indubitavelmente. Adicionalmente, que esta pesquisa possa deixar um legado metodológico de que é possível se fazer estudos de maior abrangência espacial sobre o tecido urbano, abordando questões de preocupação mais específica e particularizada, tomando como base o método empregado, cujas bases para sua elaboração estão pautadas em uma pesquisa

prática e de fácil execução. Assim, espera-se que este trabalho seja uma fonte de encorajamento para pesquisadores e gestores públicos na realização de estudos relacionados à temática poluição urbana.

## REFERÊNCIAS

- ABRANTES, R.; ASSUNÇÃO, J.V.; PESQUERO, C.R.; BRUNS, R.E.; NÓBREGA, R.P. **Emissão de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos provenientes de veículos a gasóleo e etanol.** *Atmos. Meio Ambiente.* 43, 648–654. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.014>.
- ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: Perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Química Nova.** v. 28, n. 5, p. 859-870, 2005.
- ANDRADE, H. O clima urbano: natureza, escalas de análises e aplicabilidade. Finisterra – **Revista Portuguesa de Geografia**, v. 40, n. 80, p. 67–91, 2005.
- ANJOS, M.; LOPES, A.; ALVES, E. Uso dos modelos CAL3QHC e I-Tree Canopy na avaliação da qualidade do ar em Aracaju: estimativas da concentração de PM10 em vias de tráfego intenso de automóveis. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 22, n. 3, p. 707-728, dez. 2018. ISSN 2179-0892.
- ARBEX, M. A.; SANTOS, U. P, MARTINS, L; C.; SALDIVA, P. H. N.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L F. A poluição do ar e o sistema respiratório. **J. bras. pneumol.** [Internet]. 2012 Out [citado 2020 Fev 19] ; 38( 5 ): 643-655. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-7132012000500015&lng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-7132012000500015&lng=pt). <https://doi.org/10.1590/S1806-37132012000500015>.
- ARBEX, M. A.; MARTINS, L.C.; DE OLIVEIRA, R.C.; PEREIRA, L.A.; ARBEX, F.; CANÇADO J. E. D.; SALDIVA, P. H. N.; BRAGA, A.L.F. *Air pollution from biomass burning and asthma hospital admissions in a sugar cane plantation area in Brazil.* **J. Epidemiol Community Health.** 2007;61(5):395-400. <http://dx.doi.org/10.1136/jech.2005.044743>.
- ARYA, S.P. **Introdução à Micrometeorologia.** Academic Press. San Diego. Pág.415. 2001.
- ASSIS, W. L. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva têmporo-espacial.** 299 p. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.
- AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os trópicos.** 2.ed. Rio de Janeiro, Bertrand do Brasil, 1988.
- BAKLANOV, A.; MOLINA, L. T.; GAUSS, M. *Megacities, air quality and climate.* **Atmospheric Environment**, Volume 126, 2016, Pages 235-249, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231015305665>)
- BELL, M.L.; DOMINICI, F.; SAMET, J.M. Uma meta-análise de estudos de séries temporais de ozônio e mortalidade em comparação com o estudo nacional de morbidade, mortalidade e poluição do ar. **Epidemiologia**, v. 16, 436–445, 2005. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000165817.40152.85>.

BELLEUDI, V.; FAUSTINI, A.; STAFOGGIA, M.; CATTANI, G.; MARCONI, A.; PERUCCI, C. A.; FORASTIERE, F. *Impact of fine and ultrafine particles on emergency hospital admissions for cardiac and respiratory diseases. Epidemiology*. 2010;21(3):414-23. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181d5c021>.

BRANDALISE, LA.; HEINECK CA. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Belo Horizonte, Folha SE.23-Z-CIV. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Brasília, CPRM. 190p.1999

BRASIL. **Resolução CONAMA 491**, 2018. Brasília. Publicado em: 21/11/2018 | Edição: 223 | Seção: 1 | Página: 155. Órgão: Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. Resolução CONAMA 506, 2018. Brasília. Publicado em: 09/07/2024 | Edição: 130 | Seção: 1 | Página: 133. Órgão: Ministério do Meio ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente.

BRITO, J.; RIZZO, L. V.; HERCKES, P.; VASCONCELLOS, P. C.; CAUMO, S. E. S.; FORNARO, A.; YNOUE, R. Y.; ARTAXO, P.; ANDRADE, M. F. 2013. **Caracterização físico-química do material particulado no interior de dois túneis rodoviários na Região metropolitana de São Paulo**: Atmos. Química. Física. 13, 12199–12213. <https://doi.org/10.5194/acp-13-12199-2013>.

BROOK, R. D.; RAJAGOPALAN, S.; POPE III, C. A.; BROOK, J. R.; BHATNAGAR, A.; DIEZ-ROUX, A. V.; HOLGUIN, F.; HONG, Y.; LUEPKER, R. V.; MITTLEMAN, M. A.; PETERS, A.; SISCOVICK, D.; SMITH, S. C.; WHITSEL, L.; KAUFMAN, J. D. **Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. Circulation**. 2010;121(21):2331-78. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d5c021>.

CAMACHO, F. L. M. **Características da ilha de poluição do ar urbana na região metropolitana de São Paulo: uma abordagem combinando dados de satélite e de superfície**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2022.

CAO, Y.U.; XIAOQIAN, F.; JIAYI, W.; GUOYU, L.; YAN L. *Measuring the Urban Particulate Matter Island Effect with Rapid Urban Expansion. International Journal of Environmental Research and Public Health* 17.15 (2020): 5535. Web.

CARLISLE, A.J.; SHARP, N.C. *Exercise and outdoor ambient air pollution. Br J Sports Med*. 2001;35(4):214-22. <http://dx.doi.org/10.1136/bjsm.35.4.214>.

CAVALCANTI, A. **Belo Horizonte e seu clima. Belo Horizonte**: Publicitá Comunicação e Propaganda Ltda, 1948. 113p.

CAVALCANTI, P. M. S. **Avaliação dos Impactos Causados na Qualidade do Ar pela Geração Termelétrica**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2003.

CETESB. Acesso realizado em 24 de novembro de 2024. <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>

CRUTZEN, P. J. **New Directions: The Growing Urban Heat and Pollution “island” Effect—impact on Chemistry and Climate.** *Atmospheric Environment* (1994) 38.21 (2004): 3539-540. Web.

DOWNS, S. H.; SCHINDLER, C.; LIU, L. J.; KEIDEL, D.; BAYER-OGLESBY, L., BRUTSCHE, M. H.; GERBASE, M. W.; KELLER, R.; KÜNZLI, N.; LEUENBERGER, P.; PROBST-HENSCH, N.; TSCHOPP, J.; ZELLWEGER, J.; ROCHAT, T.; SCHWARTZ, J.; ACKERMANN-LIEBRICH, U. *Reduced exposure to PM10 and attenuated age-related decline in lung function.* *N Engl J Med.* 2007;357(23):2338-47. <http://dx.doi.org/10.1056/NEJMoa073625>. Disponível em: 1056/NEJMoa073625.

FALLMANN, J. **Numerical Simulations to Assess the Effect of Urban Heat Island Mitigation Strategies on Regional Air Quality.** *Universität zu Köln.* 2014. <http://kups.ub.uni-koeln.de/5913/>.

FALLMANN, J.; FORKEL, R.; EMEIS, S. **Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality.** *Atmos. Environ.* 125, 199–211.2016.

FARIAS, H. S. De; OLIVEIRA, J. L. F. De. **Bacias Aéreas: Uma Proposta Metodológica para o Estudo da Qualidade do Ar em Áreas Influenciadas pelo Relevo.** *Revista Brasileira De Climatologia*, 2013, Vol.12 (1). Web.

FARIAS, Heitor Soares de; LUCENA, Andrews José de; MIRANDA, Vitor Fonseca Vieira Vasconcelos de. *Urban Environmental Changes in South America: A Study on Air Pollution and Urban Heat Island over Rio de Janeiro.* In: **Practices in Regional Science and Sustainable Regional Development.** Springer, Singapore, 2021. p. 171-197.

FORNADO, A. LAPAt – **Laboratório de Análises de Processos Atmosféricos.** [www.lapat.iag.usp.br](http://www.lapat.iag.usp.br). Acesso em 22 de julho de 2021.

FREITAS, C. U. de; JUNGER, W.; LEON, A. P. De; GRIMALDI, R.; SILVA, M. A. F.; GOUVEIA, N. **Poluição do ar em cidades brasileiras: selecionando indicadores de impacto na saúde para fins de vigilância.** *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, v. 22, n. 3, p. 445–454, 2013.

FUZZI, S.; ANDREAR, M. O.; HUEBERT, B. J.; KULMALA, M.; BOND, T. C.; BOY, M.; DOHERTY, S. J.; GUENTHER, A.; KANAKIDOU, M.; KAWAMURA, K.; KERMINEN, V. M.; LOHMANN, U.; RUSSEL, L. M.; PÖSCHL, U. *Critical assessment of the current state of scientific knowledge, terminology, and research needs concerning the role of organic aerosols in the atmosphere, climate, and global change.* *Atmospheric chemistry and physics.* v. 6, p. 2017-2038, 2006.

FUZZI, S.; DECESARI, S.; FACCHINI, M. C.; CAVALLI, F.; EMBLICO, L.; MIRCEA, M.; ANDREAE, M. O.; TREBS, I.; HOFFER, A.; GUYON, P.; ARTAXO, P.; RIZZO, L. V.; LARA, L. L.; PAULIQUEVIS, T.; MAENHAUT, W.; RAES, N.; CHI, X.; MAYOL-BRACERO, O. L.; SOTO-GARCIA, L. L.; CLEYS, M.; KOURTCHEV, I.; RISSLER, J.; SWIERLICKI, E.; TAGLIAVINI, E.; SCHKOLNIK, G.; FALKOVICH, A. H.; RUDICH, Y.; FISCH, G.; GATTI, L. V. *Overview of the inorganic and organic composition of size-segregated aerosol in Rondônia, Brazil, from the biomass-burning period to the onset of the wet season.* *Journal of Geophysical Research.* v. 112, n. D01201, 2007.

GAUDERMAN, W. J.; AVOL, E.; GILLILAND, F.; VORA, H.; THOMAS, D.; BERHANE K.; MCCONNELL, R.; KUENZLI, N.; LURMANN, F.; RAPPAPORT, E.; MARGOLIS, H.; BATES, D.; PETERS, J. *The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age*. N Engl J Med. 2004;351(11):1057-67. Erratum in: N Engl J Med. 2005;352(12):1276. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1056/NEJMoa040610>.

GOUVEIA, N., Junger, WL, 2018. **Efeitos da poluição atmosférica em bebês e crianças mortalidade respiratória em quatro grandes cidades latino-americanas**. Meio Ambiente. Poluição. 232, 385-391. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.125>.

GOUVEIA, N.; MENDONÇA, G. A. S.; DE LEON, A. P.; CORREIA, J. E. M.; JUNGER, W. L.; DE FREITAS, C. U.; DAUMAS, R. P.; MARTINS, L. C.; GIUSSEPE, L.; CONCEIÇÃO, G. M. S.; MANERICH, A.; CUNHA-CRUZ, J. Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras. **Epidemiologia e Serviços de saúde**, v. 12, n. 1, p. 29-40, 2003.

GOUVEIA, N.; LEON, A.P.; Junger, W.; Lins, J.F.; Freitas, C.U. Poluição do ar e impactos na saúde na Região Metropolitana de Belo Horizonte – Minas Gerais. Brasil. **Revista Ciência & Saúde Coletiva**, 2019.

HOLMES, N. S. *A review of particle formation events and growth in the atmosphere in the various environments and discussion of mechanistic implications*. **Atmospheric Environment**. v. 41, p. 2183-2201, 2007.

HUNTER, David; SALZMAN, James; ZAELKE, Durwood. International Environmental Law and Policy. 4 ed. New York: Foundation Press, 2011a. \_\_\_\_\_. International Environmental Law and Policy: treaty supplement. 3 ed. New York: Foundation Press, 2011b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Clima do Brasil**. 2002. [http://geofp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map\\_BR\\_clima\\_2002.pdf](http://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf). Acesso em 23 de dezembro de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados horários de quatro estações meteorológicas (Lourdes e Pampulha) e Normais Climatológicas**. Disponível em: [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br). Acesso em: maio de 2024.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. **Relatório anual de qualidade do ar (INEA)**. 91p. 2007.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. **Relatório anual de qualidade do ar (INEA)**. 105p. 2008.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. **Relatório anual de qualidade do ar (INEA)**. 108p. 2009.

JUNIOR, J. C. U.; AMORIM, C. C. T. **Reflexões acerca do sistema clima urbano e sua aplicabilidade: pressupostos teóricos-metrológicos e inovações técnicas**. Revista do Departamento de Geografia Universidade de São Paulo. Volume Especial, 2016. ISSN 2236-2878. Disponível em: <http://Refleões acerca do clima urbano e sua aplicabilidade.pdf>

JUNIOR, A. R.; SHAYANNE, R. N.; ASSIS, W.L. Revisão bibliográfica dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde humana: breve análise crítica da atual legislação brasileira sobre os padrões de qualidade do ar. **Cadernos do Leste**, v.21, n.21. ISSN 1679-5806.

JUNIOR, A. R.; ASSIS, W.L. Análise crítica da nova Resolução CONAMA 491/19 que estabelece os padrões de qualidade do ar: suas implicações para empreendimentos de grande porte. Air Pollution Conference Brazil. CMAS South America. 2019.

JUNIOR, W. R.; PARIZZI, M. G. Caracterização das Unidades Geotécnicas da Porção Leste da Região Metropolitana de Belo Horizonte – MG. CPMTC - Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa, Instituto de Geociências, UFMG.  
doi:10.18285/geonomos.v26i2.12565. 2018

KÜNZLI, N.; BRIDEVAUX, P. O.; LIU, L. J. S.; GARCIA-ESTEBAN, R.; SCHINDLER, C.; GERBASE, M. W.; SUNYER, J.; KEIDEL, D.; ROCHAT, T. *Traffic-related air pollution correlates with adult-onset asthma among never-smokers. Thorax*. 2009;64(8):664-70.  
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1136/thx.2008.110031>.

LI, H.; MEIER, F.; LEE, X.; CHAKRABORTY, T.; LIU, J.; SCHAAP, M.; SODOUDI, S. *Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. Science of the total environment*, v. 636, p. 818-828, 2018.

LI, H.; SODOUDI, S.; LIU, J.; TAO, W. *Temporal variation of urban aerosol pollution island and its relationship with urban heat island. Atmospheric Research*, v. 241, p. 104957, 2020.

LI, J.; ZHOU, M.; LENSCHOW, D. H.; CHENG, Z.; DOU, Y. *Observed relationships between the urban heat island, urban pollution island, and downward longwave radiation in the Beijing area. Earth and Space Science*, v. 7, n. 6, p. e2020EA001100, 2020.

LI, Z.; XIE, M.; WANG, H.; CHEN, B.; WU, R.; CHEN, Y. *The spatiotemporal heterogeneity of the relationship between PM<sub>2.5</sub> concentrations and the surface urban heat island effect in Beijing, China. Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, v. 46, n. 1, p. 84-104, 2022.

LI, J.; CARLSON, B. E.; LACIS, A. A. *How well do satellite AOD observations represent the spatial and temporal variability of PM<sub>2.5</sub> concentration for the United States? Atmospheric Environment*, v. 102, p. 260–273, 2015.

LUCAS, Taíza de Pinho Barroso et al. Impactos hidrometeorológicos em Belo Horizonte-MG. **Revista Brasileira de Climatologia** Ano, 2015.

MINAS GERAIS, FEAM. **Monitoramento da Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte Período de 2001 a 2002**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2003.

MINAS GERAIS, FEAM. **Monitoramento da Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte Período de 2003 a 2004**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2005.

MINAS GERAIS, FEAM. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2008, 2018, 2022....

MIRANDA, R. M.; ANDRADE, M. F.; FORNARO, A.; ASTOLFO, R.; DE ANDRE, P. A.; SALDIVA, P. *Urban air pollution: a representative survey of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations in six Brazilian cities*. *Air Quality, Atmosphere & Health*, v. 5, n. 1, p. 63-77, 2012.

MIRANDA, R.M.; ANDRADE, M.F.; FORNARO, A., ASTOLFO, R., ANDRE, P.A, SALDIVA, P. Poluição do ar urbano: um levantamento representativo das concentrações de massa de PM 2,5 em seis cidades brasileiras. **Qual. do ar. Atmos. Saúde** 5, 63–77. 2012. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0124-1>.

MIRANDA, R.M., ANDRADE, M.F., RIBEIRO, F.N.D., MENDONÇA, F.K.J; PEREZ-MARTÍNEZ, P.J. **Rateio de fonte de material particulado fino por positivo fatoraçoão matricial na região metropolitana de São Paulo, Brasil**. *J. Limpo. Prod.* 202, 253-263. 2018. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.100>.

MIRANDA, R.M, Perez-Martinez, P.J, Andrade, M.F, Ribeiro, F.N.D. **Relação entre carbono negro (BC) e tráfego pesado em São Paulo**. *Transp. Meio Ambiente*. 68, 84–98. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.09.002>. 2019.

MMA. **Guia Técnico para Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar**, 2019.

MONTEIRO, C. A. F. C. A. F. **Frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada suboriental do Brasil**. São Paulo, Série Teses e Monografia 1, USP-IG, 1969, 68p.

\_\_\_\_\_. Análise rítmica em climatologia; problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho. São Paulo, **Série Climatologia Dinâmica I**, USP-IG, 1971, 21p.

\_\_\_\_\_. *Environmental Problems in São Paulo Metropolitan Area: the role of urban climate with special focus on flooding*. In: *Symposium on Geographical Aspects of Environmental Problems in Highly Urbanized Territories*. 24<sup>th</sup> International Geographical Congress, IGU, Tokio, 1980.

\_\_\_\_\_, C. A. F. Por um suporte teórico e prático para estimular estudos geográficos do clima urbano do Brasil. **GEOSUL**, Florianópolis, v.5, n.9, p.07-19. 1990a.

\_\_\_\_\_. Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura. **GEOSUL**, Florianópolis, v.5, n.9, p.61-79. 1990b.

\_\_\_\_\_. A cidade como processo derivador ambiental e a geração de um clima urbano; estratégia de abordagem geográfica. **GEOSUL**, Florianópolis, v.5, n.9, p.80- 114. 1990c.

\_\_\_\_\_, M. A.; FURTADO, S. M. de A. O clima no trecho Florianópolis – Porto Alegre: uma abordagem dinâmica. **Revista do Departamento de Geociências – GEOSUL**, Florianópolis: Editora da UFSC, n. 19/20, p. 116 – 133, 1º e 2º semestre de 1995.

\_\_\_\_\_. Teoria e clima urbano: Um projeto e seus caminhos. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (orgs). **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, p. 9-67, 2003.

\_\_\_\_\_. **Teoria e clima urbano. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo.** (Série Teses e Monografias, 25) 1976. Disponível em: <[http://www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio\\_Emerson/2015/noturno/Referencias\\_Bibliograficas/Geosul9.pdf](http://www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Emerson/2015/noturno/Referencias_Bibliograficas/Geosul9.pdf)>. Acesso em: 11 abr 2017.

NEVES, O. R. **Escritório de Histórias**. Codemig – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais – 10 anos. Belo Horizonte: 2014. Acessado em 05 de maio de 2024. Disponível em: <http://www.codemge.com.br/atividades-em-destaque/distritos-industriais/historico/>.

NGARAMBE, J.; JOEN, S. J.; HAN, C. -H.; YUN, G. Y. *Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and urban heat island in Seoul, Korea*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, n. 2, p. 123615, 2021.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 421p.

NOGUEIRA T., DOMINUTTI PA, CARVALHO LRF, FORNARO A., ANDRADE, MF, 2014. **Medições de formaldeído e acetaldeído em atmosfera urbana impactada pelo uso do biocombustível etanol: região metropolitana de São Paulo (MASP), 2012- 2013**. Combustível 134, 505–513. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.091>.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. Routledge, 2002.

\_\_\_\_\_. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. In: **World Meteorological Organization. Instruments and observing methods: report n°81**. WMO/TD n° 1250. 2004.

\_\_\_\_\_. *Towards better scientific communication in urban climate*. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 84, n. 1-3, p. 179-190, 2006.

\_\_\_\_\_. *Urban environments*. In: **Surface Climates of Canada, Bailey, W.G., T.R. Oke and W.R. Rouse, eds., McGill-Queen's University Press, Montréal**. p. 303-327. 1997.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. *Urban climates*. In: **Urban Climates. United Kingdom: Cambridge University Press**, 2017. p. 294–331.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia**. 1986. 114 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

OLIVEIRA, E. A. M. **A imigração italiana e a organização operária em Belo Horizonte nas primeiras décadas do século XX**. 2004. 93 f. Monografia (Especialização em História) – Faculdades Integradas de Pedro Leopoldo, Pedro Leopoldo, 2004a.

OLIVEIRA, J. L. F. **Análise espacial e modelagem atmosférica: contribuições ao gerenciamento da qualidade do ar da bacia aérea III da região metropolitana do Rio de**

**Janeiro.** Tese de Doutorado – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 144p, 2004b.

OLIVER, J. F.; FAIRBRIDGE, R. W. *Encyclopedia of Climatology*. New York: V. N. Reinhold, 1987.

OPAS - Organização Pan- Americana da Saúde. **Mudanças climáticas e ambientais e seus efeitos na saúde: cenários e incertezas para o Brasil.** Brasília (DF), 2008.

ORGANIZAÇÃO PAN AMERICANA DE SAÚDE- OPAS. Organização Mundial da Saúde . (2021). Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: material particulado (PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono. Organização Mundial da Saúde. <https://iris.who.int/handle/10665/345329> . Licença: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. ISBN 9789240034228 (versão eletrônica)

PARK, S. et al. *Studying Air Pollutants Origin and Associated Meteorological Parameters over Seoul from 2000 to 2009.* *Advances in Meteorology*, p. 12, 2015.

PINTO, J. A.; KUMARC, P.; ALONSO, M. F., PEDROZZIA, R.; ALBUQUERQUE, T. T. de A.; ANDREÃO W. L., ESPINOSA, S. I. *Kriging method application and traffic behavior profiles from local radar network database: A proposal to support traffic solutions and air pollution control strategies.* *Sustainable Cities and Society*. Volume 56, May 2020, 102062.

PIRES, DILSON OJEDA. **Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e sua Contribuição para a Poluição do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro [Rio de Janeiro]** 2005 VI, 188 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc., Planejamento Energético, 2005) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

POPE III, C. A.; BURNETT R. T.; THURSTON, G. D.; THUN, M. J.; CALLE, E. E.; KREWSKI D.; GODLESKI, J. J. *Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease.* *Circulation*. 2004;109(1):71-7. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F>.

POPE III, C. A.; BURNETT, R. T.; THUN, M. J.; CALLE, E. E.; KREWSKI D.; ITO K.; THURSTON, G. D. *Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution.* *JAMA*. 2002;287(9):1132-41. <http://dx.doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>.

POPE III, C. A. *Respiratory Hospital Admissions Associated with PM<sub>10</sub> Pollution in Utah Salt Lake, and Cache Valleys.* *Arch. Environ. Health* v. 46, 1991, pp. 90-7.

POPE III, C. A. DOCKERY, D. W. *Acute Health Effects of PM<sub>10</sub> Pollution on Symptomatic and Asymptomatic Children.* *Am. Rev. Respir. Dis.* 145, 1992, pp. 1.123-8.  
PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **6º Inventário Municipal de Emissões de GEE.** Relatório técnico de atualização e extração dos dados período: 2009-2021.

POPE III, C. A. *Mortality effects of longer term exposures to fine particulate air pollution: review of recent epidemiological evidence.* *Inhal Toxicol*. 2007;19 Suppl 1:33-8. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/08958370701492961>.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Bacias e sub-bacias hidrográficas do município de Belo Horizonte**. Disponível em: <[https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/anexo-1\\_1degedicao-pdf.pdf](https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/anexo-1_1degedicao-pdf.pdf)>. Acesso em: 11 jul. 2024.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Mapa de Declividades**. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/dados/mapa-de-declividades>>. Acesso em: 11 jul. 2024.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL)**. Base Cadastral PRODABEL, 2017.

RADICCHI, A. L. A. A poluição na bacia aérea da região metropolitana de Belo Horizonte e sua repercussão na saúde da população. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v.29, nº1 São Paulo, Jan/Jun, 2012. 29.1 (2012): 195-98. Web.

RADICCHI, A. L. A.; FILOGONIO, C. J. B.; SCHAWABE, W. K.; RIBEIRO, C. M.; MACEDO, M. I. A. **Estudo de prevalência da asma e rinite alérgica em crianças residentes em Belo Horizonte e Betim e sua relação com a poluição do ar**. In: 24º Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental. Anais. Belo Horizonte, 2007.

RADICCHI, A. L. A.; SENNA, M. I. B.; CAMARGOS, P. A. M.; SCHAWABE, W. K. Estudo de tendência da asma e rinite alérgica em crianças residentes em duas áreas geográficas com diferentes níveis de poluição do ar, Ibirité/MG. In: 11º Congresso Mundial De Saúde Pública. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pós-Graduação em Saúde Coletiva, 2006.

RAMOS, Maria Helena D.; VIANA, Cláudia S.; BAPTISTA, Márcio B. Classificação dos solos de Belo Horizonte segundo grupos hidrológicos do US Soil Conservation Service. **Publicado nos anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, 1999.

RIOJAS R., H., da Silva, A.S., Texcalac-Sangrador, J.L, Moreno-Banda, G.L, 2016. Gestão e controle da poluição atmosférica na América Latina e no Caribe: implicações para as mudanças climáticas. **Revista Panamericana de Salud Pública** 40 (3), 150–159. Disponível em: <https://www.scielosp.org/article/rpsp/2016.v40n3/150-159/>.

SAMOLI E, NASTOS PT, PALIATSOS AG, KATSOUYANNI K, PRIFTIS KN. *Acute effect sof air pollution on pediatric asthma exacerbation: evidence of association and effect modification*. **Environ Res**. 2011;111(3):418-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2011.01.014>.

SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; DE FÁTIMA ANDRADE, M. *The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in São Paulo, Brazil*. **Environmental Pollution**, v. 116, n. 2, p. 257–263, 2002.

SANTOS, Ubiratan de Paula; ARBEX, Marcos Abdo; BRAGA, Alfésio Luis Ferreira; TERRA-FILHO, Mário; MIZUTANI, Rafael Futoshi; CANÇADO, José Eduardo Delfini; Chatkin, José Miguel. Poluição do ar ambiental: efeitos respiratórios. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 47, 2021.

SANTOS, R. M. **Influência da morfologia urbana nas condições de conforto térmico em uma fração urbana da cidade de Belo Horizonte**. 1999. 128f. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração tecnologia) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 1999.

SANTOS, U. de P. Poluição, aquecimento global e repercussões na saúde. **Revista da Associação Médica Brasileira**, v. 53, n. 3, p. 193–194, 2007.

SANTOS F. S., ANDRÉ, W. L.; MIRANDA, G. A.; CARVALHO, A. N. M.; PINTO J. A. PEDRUZZI, Rizzieri, CARVALHO Vanessa Silveira Barreto, ALBUQUERQUE T.T. A.; *Vehicular air pollutant emissions in a developing economy with the widespread use of biofuels*. **Urban Climate** Volume 38, July 2021, 100889. ISSN 2212-0955, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100889>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221209552100119X>).

SARRAT, C., LEMONSU, A., MASSON, V., GUEDALIAC, D., 2006. *Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution*. **Atmos. Environ.** 40 (10), 1743–1758.

SCHIKOWSKI, T.; SUGIRI, D.; RANFT, U.; GEHRING, U.; HEINRICH, J.; WICHMANN, H. E.; KRÄMER, U. *Long-term air pollution exposure and living close to busy roads are associated with COPD in women*. **Respir Res.** 2005;6:152. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/1465-9921-6-152>.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change**. 2 ed. Wiley, New York. (2006).

SEINFELD, J. H.; PANKOW, J. F. *Organic atmospheric particulate material*. **Annual Review of Physical Chemistry**. v. 54, p. 121-140, 2003.

STERN. A.C. **Fundamentals of Air Pollution**. Academic Press. Third Edition. 1984.

STULL. R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Library of Congress Cataloging in Publication data. 1988. ISBN 90-277-2768-6.

SUAREZ Bertoa, R. ZARDINI AA, KEUKEN H., ASTORGA C. **Impacto de misturas de gasolina contendo etanol nas emissões de um veículo flex-fuel testado no ciclo mundial harmonizado de testes para serviços leves (WLTC)**. 2015. *Combustível* 143, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.076>.

SUTANTO, S.; ERNI, S. T. *Study on correlation between motor vehicle emission and public health*. **Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v.5, p.1841-1856, 2005.

ULPIANI, G. *On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework*. **Science of the Total Environment**, v. 751, p. 141727, 2021.

VILELA, Jacqueline Alves. **Variáveis do clima urbano: análise da situação atual e prognósticos para a região do bairro Belvedere III, Belo Horizonte, MG**. 2007.

WAGNER, P., SCHÄFER, K., 2017. *Influence of mixing layer height on air pollutant concentrations in an urban street canyon*. **Urban Climate** 22, 64–79.

WESELY, M. L.; HICKS, B. B. *A review of the current status of knowledge on dry deposition*. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 2261-2282, 2000.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**. Copenhagen: World Health Organization; 2005.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for surveillance of drug resistance in tuberculosis**. WHO/Tb, 1994;178:1-24.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Nove em cada dez pessoas em todo o mundo respiram ar poluído; Determinantes Sociais e riscos para a Saúde, Doenças Crônicas Não Transmissíveis e saúde Mental**. WHO, 2018.


WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Glossary on air pollution**. WHO, 1980; pág. 76.

World Health Organization. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>. Licença: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. 2021

ZHANG, Z.; ZHANG, X.; GONG, D.; QUAN, W.; ZHAO, X.; MA, Z.; KIM, S. -J. *Evolution of surface O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing*. **Atmospheric Environment**, v. 108, p. 67–75, 2015.

ZHU, L.; HUANG, Q.; REN, Q.; YUE, H.; JIAO, H.; HE, C. *Identifying urban haze islands and extracting their spatial features*. **Ecological Indicators**, v. 115, n. January, p. 106385, 2020.

**ANEXO A- Certificado de Calibração da Estação Automática de Qualidade do Ar**




### CERTIFICATE OF CALIBRATION AND TESTING

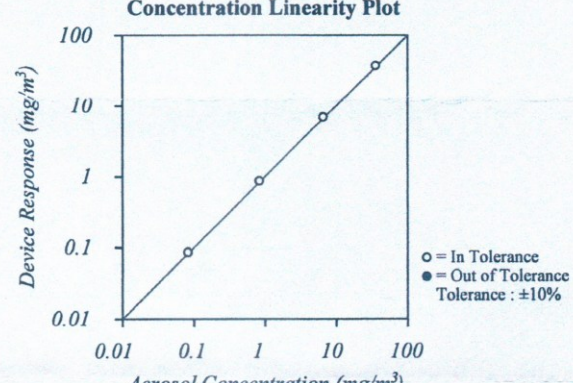
TSI Incorporated, 500 Cardigan Road, Shoreview, MN 55126 USA  
 Tel: 1-800-874-2811 1-651-490-2811 Fax: 1-651-490-3824 http://www.tsi.com

Environment Conditions			Model	8533
Temperature	72.1 (22.3)	°F (°C)	Serial Number	8533111101
Relative Humidity	25	%RH		
Barometric Pressure	29.24 (990.2)	inHg (hPa)		

As Left       In Tolerance  
 As Found       Out of Tolerance
 



#### Concentration Linearity Plot

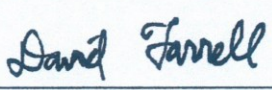


System ID: DTII01-01

FLOW AND PRESSURE VERIFICATION				SYSTEM DTII01-01			
Parameter	Standard	Measured	Allowable Range	Parameter	Standard	Measured	Allowable Range
Flow lpm	3.00	3.03	2.88 ~ 3.12	Pressure kPa	98.9	98.9	94.00 ~ 103.89
Full Flow lpm	N/A	5.53	>3.80				

*TSI Incorporated does hereby certify that all materials, components, and workmanship used in the manufacture of this equipment are in strict accordance with the applicable specifications agreed upon by TSI and the customer and with all published specifications. All performance and acceptance tests required under this contract were successfully conducted according to required specifications. There is no NIST standard for optical mass measurements. Calibration of this instrument performed by TSI has been done using emery oil and has been nominally adjusted to respirable mass per standard ISO 12103-1, A1 test dust (Arizona dust). Our calibration ratio is greater than 1.2:1*

<u>Measurement Variable</u>	<u>System ID</u>	<u>Last Cal.</u>	<u>Cal. Due</u>	<u>Measurement Variable</u>	<u>System ID</u>	<u>Last Cal.</u>	<u>Cal. Due</u>
Photometer	E003433	09-27-22	03-31-23	Flowmeter	E003149	07-11-22	07-31-23
DC Voltage(Keithley)	E002455	06-09-22	06-30-23	Microbalance	M001324	02-09-23	02-28-25
Pressure	E005651	07-21-22	07-31-23	1 um PSL	698880	n/a	n/a
3 um PSL	702200	n/a	n/a	10 um PSL	247067	n/a	n/a



\_\_\_\_\_  
Calibrated

February 16, 2023

\_\_\_\_\_  
Date

TSI PIN 2801167