



**NÁTHALY CRISTINE FERREIRA**

**POLUENTES ATMOSFÉRICOS E DOENÇAS RESPIRATÓRIAS:  
VALIDANDO A RELAÇÃO ENTRE DADOS DE INTERNAÇÕES E  
AMBIENTAIS NA REGIÃO DE BELO HORIZONTE**

**LAVRAS-MG**

**2021**

**NÁTHALY CRISTINE FERREIRA**

**POLUENTES ATMOSFÉRICOS E DOENÇAS RESPIRATÓRIAS:  
VALIDANDO A RELAÇÃO ENTRE DADOS DE INTERNAÇÕES E  
AMBIENTAIS NA REGIÃO DE BELO HORIZONTE**

Monografia apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Curso de  
Engenharia Ambiental e Sanitária, para a  
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr.: Marcelo Vieira da Silva Filho

Orientador

**LAVRAS-MG**

**2021**

**NÁTHALY CRISTINE FERREIRA**

**POLUENTES ATMOSFÉRICOS E DOENÇAS RESPIRATÓRIAS:  
VALIDANDO A RELAÇÃO ENTRE DADOS DE INTERNAÇÕES E  
AMBIENTAIS NA REGIÃO DE BELO HORIZONTE**

Monografia apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do Curso de Engenharia  
Ambiental e Sanitária, para a obtenção do  
título de Bacharel.

APROVADA em 30 de Janeiro de 2021

Dr. Marcelo Vieira da Silva Filho UFLA

Dr. Breno Fiuza Cruz UFMG

Dra. Evelise Roman Corbalan Gois Freire UFLA

Prof. Dr.: Marcelo Vieira da Silva Filho

Orientador

**LAVRAS-MG**

**2021**

*À minha mãe Elaine e aos meus irmãos Yasmin e Natanel.*

***DEDICO***

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por guiar os meus passos na jornada da vida e ter me dado forças e sabedoria nos momentos em que me senti perdida.

Agradeço também a minha mãe Elaine, que sempre me apoiou e cuidou de mim, mesmo quando a distância física e as dificuldades da vida pareciam tornar isso impossível. Aos meus irmãos Yasmin e Natanael, por terem acompanhado meus sonhos e sempre terem me apoiado, mesmo quando isso significava ter que me aguentar sob uma carga considerável de estresse.

Gostaria de agradecer também à Universidade Federal de Lavras e seu corpo docente, sem todo o esforço empenhado para nos oferecer um ensino de qualidade nada disso seria possível.

Ao Núcleo de Estudos em Poluição Urbana e Agroindustrial – NEPUAI, que me fez enxergar que existe um mundo de possibilidades dentro da área ambiental além daquelas vistas em sala de aula, por ter membros maravilhosos, que desempenham suas atividades com muito amor e responsabilidade. O céu é o limite para o que vocês conseguirão alcançar.

Ao meu orientador, Marcelo Vieira da Silva Filho, um ser humano excepcional, pela sua paciência, dedicação e paixão por ensinar e ajudar. Sou grata também por ter aceitado ser tutor do NEPUAI e nos ensinado a ter pelo menos um pouco da paixão pelas ciências atmosféricas que existe dentro de você.

Por fim, gostaria de agradecer aos amigos com os quais a graduação me presenteou. Em especial Pedro Eduardo, Jaqueline Alice e Cassiano Ronald, que caminharam comigo durante essa íngreme estrada rumo à graduação, me ajudando mais do que podem imaginar. Obrigada pelo companheirismo e paciência.

## RESUMO

A poluição atmosférica pode ser definida como a presença de químicos tóxicos e compostos no ar – incluindo aqueles de origem biológica, em níveis que exponham risco a saúde e reduzam a qualidade do ar. Tanto processos naturais quanto antrópicos contribuem para a poluição atmosférica, no entanto, diferentemente dos processos naturais, a atuação antrópica contribui para um rápido declínio na qualidade do ar. As partículas atmosféricas que levam a problemas de saúde são poluentes comuns em áreas urbanas, o que exige extenuantes estudos acerca da concentração de massa e composição de aerossóis, visto que elevadas concentrações de poluentes, em especial o material particulado, têm sido associadas à elevação da morbidade e mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias. Além disso, pode ocasionar danos ao cérebro, nervos, fígado e rins, pneumonia ou até mesmo morte prematura. No mundo, nove a cada dez pessoas respiram ar contendo níveis elevados de poluentes, ocasionando anualmente a morte de aproximadamente 7 milhões de pessoas em decorrência da poluição do ar. No Brasil, no ano de 2016 foram registradas 51.820 mortes em decorrência da poluição do ar, enquanto no município de Belo Horizonte tal poluição está associada a cerca de 390 mortes anuais. Deste modo, o intuito deste trabalho foi relacionar, através de análise estatística multivariada, os dados referentes às estações monitoramento da qualidade do ar do município de Belo Horizonte e os dados de admissões hospitalares por doenças respiratórias do CID-10 Capítulo X, nos hospitais ao redor destas, através de estudos ecológicos de séries temporais, durante o período de janeiro de 2015 a dezembro de 2019. Os dados hospitalares foram avaliados conjuntamente com os dados meteorológicos de precipitação, temperatura e umidade relativa, além dos poluentes atmosféricos  $MP_{10}$ ,  $MP_{2.5}$  e  $O_3$ . Dentre os resultados cabe destacar: (i) 3450 ultrapassagens dos padrões de referência; (ii) as análises dos dados meteorológicos indicaram influência do transporte de  $O_3$  das áreas industriais da Região Metropolitana de Belo Horizonte, inclusive durante o período noturno; (iii) os modelos de regressão linear múltipla indicaram que para os grupos de crianças e idosos os poluentes atmosféricos  $MP_{10}$ ,  $MP_{2.5}$  e  $O_3$ , juntamente com as variáveis meteorológicas precipitação, umidade relativa e temperatura são capazes de explicar, respectivamente, 53% e 45% dos resultados de internações por doenças respiratórias.

**Palavras-chave:** Estudo ecológico, Modelagem de qualidade do ar, Saúde pública.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Estrutura Vertical da Atmosfera.....	12
Figura 2- Ciclo da Camada Limite Planetária.....	13
Figura 3- Fontes de poluição atmosférica e tipos de poluentes.....	15
Figura 4- Comparação entre tamanhos de material particulado.....	18
Figura 5- Nível de deposição de poluentes no organismo.....	19
Figura 6- Camada de Ozônio e Radiação Solar.....	20
Figura 7- Interpretação geométrica dos parâmetros $\beta_0$ e $\beta_1$ .....	28
Figura 8- Mapa geográfico da região metropolitana de Belo Horizonte destacando a localização das estações de monitoramento da qualidade do ar do município de Belo Horizonte - estação Contorno e estação Amazonas.....	31
Figura 9- Mapa geográfico da região metropolitana de Belo Horizonte, destacando as estações de monitoramento da qualidade do ar do município de Belo Horizonte – Contorno e Amazonas, além da localização dos hospitais utilizados para o estudo - (a) Santa Casa, (b) João XXIII, (c) João Paulo II, (d) Felício Rocho, (e) Universitário de Ciências Médicas, (f) Odilon Behrens e (g) Alberto Cavalcanti.....	32
Figura 10- Mapa de Google Earth do município de Belo Horizonte e cidades limítrofes, contendo a localização das duas Estações de monitoramento da qualidade do ar, os pontos com maiores concentrações de indústrias e rosa dos ventos para (i) Estação Contorno e (ii) Estação Amazonas.....	36
Figura 11- Formação média horária de Ozônio em Belo Horizonte.....	38
Figura 12- Variação temporal para as variáveis ambientais e interações por morbidades respiratórias no município de Belo Horizonte entre 2015 e 2019.....	40
Figura 13- Valores residuais dos modelos de regressão para os grupos de crianças, adultos e idosos.....	44

**LISTA DE SIGLAS**

BH	Belo Horizonte
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CID-10	Classificação Estatística Internacional de doenças e problemas relacionados com a saúde
CLC	Camada Limite Convectiva
CLE	Camada Limite Estável
CLN	Camada Limite Noturna
CLP	Camada Limite Planetária
CO	Monóxido de Carbono
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DATASUS	Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde do Brasil
DPOC	Doença pulmonar obstrutiva crônica
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MP	Material Particulado
MP <sub>10</sub>	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 10µm
MP <sub>2.5</sub>	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 2.5µm
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
O <sub>3</sub>	Ozônio



OMS	Organização Mundial da Saúde
PANs	Nitrato de Peroxiacetila
PP	Precipitação
PRONAR	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
R <sup>2</sup> ajust	Coefficiente de determinação ajustado
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
SQE	Varição da variável resposta não explicada no modelo – resíduo
SQR	Varição da variável resposta explicada no modelo
SQT	Varição da variável resposta
SUS	Sistema Único de Saúde
T	Temperatura
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UV	Ultravioleta
Wd	Wind direction – direção do vento
ws	Wind speed – velocidade do vento

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Padrões de Qualidade do Ar CONAMA 491/2018.....	17
Tabela 2- Informações sobre poluentes atmosféricos e seus efeitos na saúde humana.....	23
Tabela 3- Tabela de análise da variância (ANOVA).....	29
Tabela 4- Análise descritiva das variáveis atmosférica do município de Belo Horizonte. Valores máximos anuais de MP e máxima média de 8h anual de O <sub>3</sub> para o período observado.....	34
Tabela 5- Valores máximos, médios e desvio padrão para as variáveis ambientais de acordo com o período de referência estabelecido na CONAMA 491/2018 para o período de 2015 a 2019.....	35
Tabela 6- Regressão Linear Múltipla dos dados de internação e variáveis ambientais para crianças (modelo 1), adultos (modelo 2) e idosos (modelo 3).....	43

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 Atmosfera.....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Poluição atmosférica.....</b>	<b>14</b>
<b>3.3 Poluentes atmosféricos.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3.1 Material Particulado.....</b>	<b>18</b>
<b>3.3.2 Ozônio.....</b>	<b>19</b>
<b>3.4 Saúde Pública.....</b>	<b>22</b>
<b>3.5 Análises Estatísticas.....</b>	<b>27</b>
<b>3.5.1 Regressão Linear Múltipla.....</b>	<b>27</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Área de Estudo.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2 Dados de variáveis ambientais e Saúde Pública.....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 Tratamento dos dados.....</b>	<b>33</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
<b>5.1 Ultrapassagens dos Padrões de Qualidade do Ar.....</b>	<b>34</b>
<b>5.2 Influência do Transporte Atmosférico.....</b>	<b>35</b>
<b>5.3 Associações entre Poluentes Atmosféricos e as Admissões Hospitalares.....</b>	<b>39</b>
<b>5.4 Modelos Lineares Múltiplos.....</b>	<b>42</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O homem tem contribuído para a deterioração da qualidade do ar desde a descoberta do fogo, apesar de fazê-lo sem a consciência das consequências de seus atos (BRAGA, A. *et al.*, 2001). Apesar disso, foi somente a partir da Revolução Industrial que a poluição passou a atingir a população em grandes proporções (ABDO ARBEX *et al.*, 2012). A urbanização acelerada ocasionada em todo o mundo após a Revolução Industrial acarretou um aumento no consumo de energia e emissão de poluentes provenientes da queima de combustíveis fósseis pelas indústrias e veículos automotores, afetando a população em grandes proporções, que atualmente tenta evitar os efeitos negativos causados por tais atividades na população e no planeta como um todo (ABDO ARBEX *et al.*, 2012; BRAGA, A. *et al.*, 2001).

A poluição do ar consiste na presença de uma ou mais substâncias na atmosfera em concentrações que interfiram na saúde, segurança e bem-estar do ser humano, animais e vegetais (SEINFELD; PANDIS, 2016). A exposição à poluição do ar contribui para o desenvolvimento ou agravamento de doenças crônicas respiratórias, doenças cardíacas, câncer de pulmão, bronquite, asma, pneumonia, enfisema, além de causar danos ao cérebro, nervos, rins e até mesmo ocasionar mortes prematuras. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 7 milhões de mortes ao redor do mundo foram atribuídas aos efeitos conjuntos das poluições domésticas e poluição do ar no ano de 2016.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) tem definido limites para a qualidade do ar desde 1971, estabelecendo limites médios diários e mensais para a concentração de particulados no ar, incluindo regulamentação para  $MP_{10}$  e  $MP_{2.5}$  no ano de 1997 (HEI, 2002). No Brasil, no entanto, as pesquisas relacionando poluição atmosférica e seus efeitos na saúde pública tiveram início apenas nos anos 90, com os estudos relacionados à associação entre poluição atmosférica e mortalidade por doenças respiratórias em crianças menores de 5 anos de idade na região metropolitana de São Paulo (SALDIVA, P. H.N. *et al.*, 1994). A respeito dos padrões legais para qualidade do ar em território nacional, foram estabelecidos limites para a concentração média dos poluentes monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre na Resolução CONAMA n.3 de 1990, através do Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR), posteriormente revogado pela Resolução CONAMA 491 de 2018, que acrescentou padrões para a qualidade do ar para  $MP_{10}$  e  $MP_{2.5}$ , além dos níveis de atenção, alerta e emergência para cada um dos poluentes monitorados.

À medida em que se acentuam os problemas da alta concentração urbana, faz-se necessário o aperfeiçoamento e a ampliação das políticas de controle da poluição ambiental (IEMA, 2014). Os estudos relacionando poluentes atmosféricos e saúde pública têm se focado na busca pelo entendimento no comportamento principalmente dos poluentes, mostrando associações significantes entre as flutuações na poluição do ar e nos indicadores de mortalidade e morbidade (MARTINS *et al.*, 2004). Segundo o diagnóstico de monitoramento de qualidade do ar realizado pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente em 2014, apenas 9 estados brasileiros apresentam uma rede de monitoramento da qualidade do ar, divididas nas seguintes localidades: Bahia, Distrito Federal, Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, São Paulo e Sergipe. A ausência de uma rede de monitoramento de qualidade do ar com maior extensão no país dificulta o desenvolvimento de estudos acerca do tema.

De forma a promover a redução da poluição do ar, é necessário que se entenda o contexto do ambiente local através do monitoramento da qualidade do ar e avaliação da saúde da população (DE OLIVEIRA FERNANDES *et al.*, 2020). O estado de Minas Gerais tem como capital o município de Belo Horizonte, cuja população estimada é de 2.521.564 habitantes no ano de 2020 (IBGE, 2020), sendo o sexto município mais populoso do país. A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) atualmente ultrapassa os 6 milhões de habitantes, distribuídos nos 50 municípios que contemplam a região, divididos em 16 municípios do Colar Metropolitano e 34 municípios da Região Metropolitana, se tornando o terceiro maior aglomerado urbano do país. A RMBH é uma região predominantemente urbana, destacando-se pela elevada quantidade de indústrias, principalmente dos setores minerário e metalúrgico.

O território mineiro possui 853 municípios e apenas 29 estações de monitoramento da qualidade do ar, sendo 10 alocadas na RMBH e 19 instaladas em outros 6 municípios. Os dados referentes às estações vêm sendo liberados ao público gradualmente desde o início de 2019, o que tornam recentes e escassos os estudos relacionados a qualidade do ar no estado. Os dados, disponibilizados em forma de média horária, apresentam variáveis meteorológicas, como pressão atmosférica, precipitação e umidade relativa, além dos dados de qualidade do ar regulamentados pela CONAMA 491 de 2018, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, MP<sub>10</sub>, MP<sub>2.5</sub> e O<sub>3</sub>.

Ainda não se tem muita clareza a respeito do grau de efeito de cada poluente na saúde (KOBAYASHI *et al.*, 2020), mas se tem conhecimento de que o material particulado (MP<sub>10</sub> e MP<sub>2.5</sub>) é um dos que mais afeta a saúde das pessoas (ANDREÃO; DE ALMEIDA

ALBUQUERQUE, 2020) devido a sua complexidade e facilidade em alcançar camadas mais profundas dos sistemas respiratório e cardiovascular, sendo associados às mortes por doenças cardiopulmonares e câncer de pulmão (DE OLIVEIRA FERNANDES *et al.*, 2020) e seus efeitos adversos à saúde têm sido confirmados em diversos estudos epidemiológicos (ANDREÃO *et al.*, 2020; FAJERSZTAJN *et al.*, 2017; HAMRA *et al.*, 2014; LADEN *et al.*, 2006; NASCIMENTO, A. P. *et al.*, 2017; POPE, 2000). O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) é um poluente para o qual não se encontra uma grande quantidade de estudos, provavelmente pela queda nas emissões e incertezas quanto aos seus impactos na saúde (KOBAYASHI *et al.*, 2020). O dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) também é um dos poluentes de interesse nos estudos recentes (EUM *et al.*, 2019). O monóxido de carbono (CO) é um poluente para o qual há extensas pesquisas, principalmente por conta da sua afinidade com a hemoglobina, podendo ocasionar mortes por asfixia, e está presente na atmosfera em locais onde há queima incompleta de combustíveis fósseis e biomassa, principalmente relacionado à emissão veicular, indústrias e aquecedores a óleo (CHEN *et al.*, 2011; SHARMA, 2016; TOWNSEND; MAYNARD, 2002). O ozônio (O<sub>3</sub>) é um poluente para o qual não se encontra uma variedade de estudos, porém é evidenciado que a exposição a curto prazo está relacionada a morbidades e mortalidades por doenças cardiovasculares e respiratórias, enquanto a exposição a longo prazo está relacionada às mortalidades respiratórias, desenvolvimento de asma em crianças e agravamento de casos asmáticos (NUVOLONE; PETRI; VOLLER, 2018).

## **2 OBJETIVOS**

O presente estudo visa compreender as associações entre os poluentes atmosféricos Ozônio (O<sub>3</sub>) e Material Particulado (MP<sub>10</sub> e MP<sub>2.5</sub>) e os índices de internações por doenças do aparelho respiratório, incluindo asma, pneumonia, bronquite, infecções agudas, entre outras, no município de Belo Horizonte, entre os anos de 2015 e 2019.

## **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **3.1 Atmosfera**

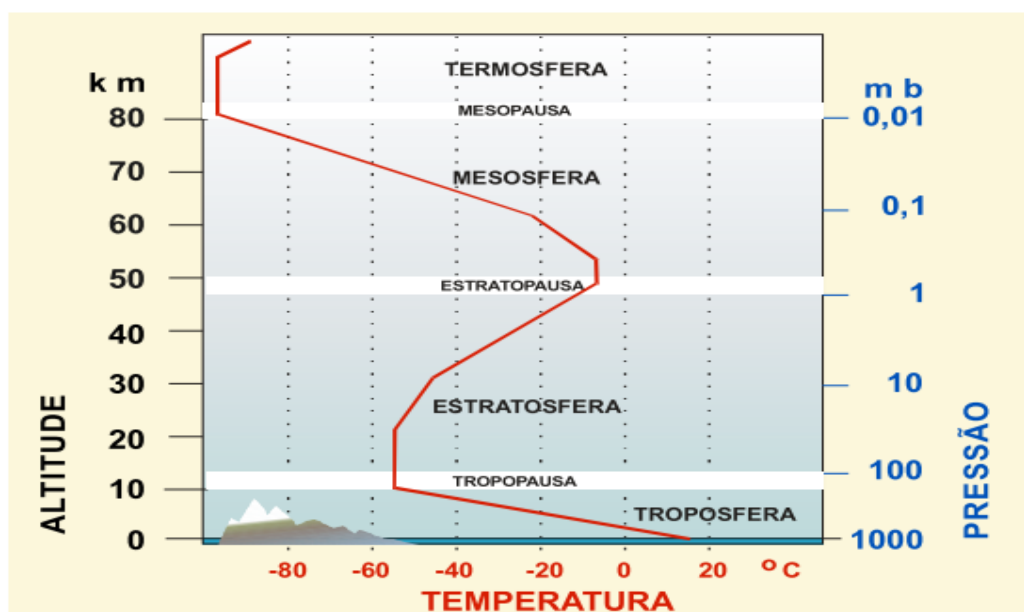
Atmosfera é a designação dada à camada que envolve a Terra, composta de vapores, gases, partículas sólidas e líquidas, sendo constituída principalmente de nitrogênio e oxigênio.

Não há um limite superior físico para a atmosfera. Para efeito de estudos meteorológicos, são considerados os primeiros 100 km de espessura, compostos por uma série de cinco camadas concêntricas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera (KEMP, 2002; RAVEN; BERG; JOHNSON, 1995; VAREJÃO-SILVA, 2006).

A troposfera é a camada mais importante sob o ponto de vista da Meteorologia (VAREJÃO-SILVA, 2006), seguindo desde a superfície terrestre até aproximadamente 11 km de altitude e apresenta uma queda na temperatura com o aumento da altitude (LOECK, 2014). Além disso, é a camada responsável pela ocorrência das condições climáticas da Terra e onde ocorre a maior parte dos fenômenos relacionados à poluição do ar e apresenta um gradiente vertical com o decréscimo de temperatura com a altitude, de aproximadamente  $6,5^{\circ}\text{C}$  por quilômetro.

Do ponto de vista ambiental, a estratosfera é uma camada muito importante, visto que é nela que se encontra a camada mais espessa de ozônio, que protege a Terra das radiações ultravioleta oriundas do sol (BRAGA *et al.*, 2005). O gradiente vertical nessa camada revela um acréscimo de temperatura com a altitude, devido à liberação de energia no processo de formação do ozônio (VAREJÃO-SILVA, 2006), podendo ser observado na Figura 1.

**Figura 1-** Estrutura Vertical da Atmosfera

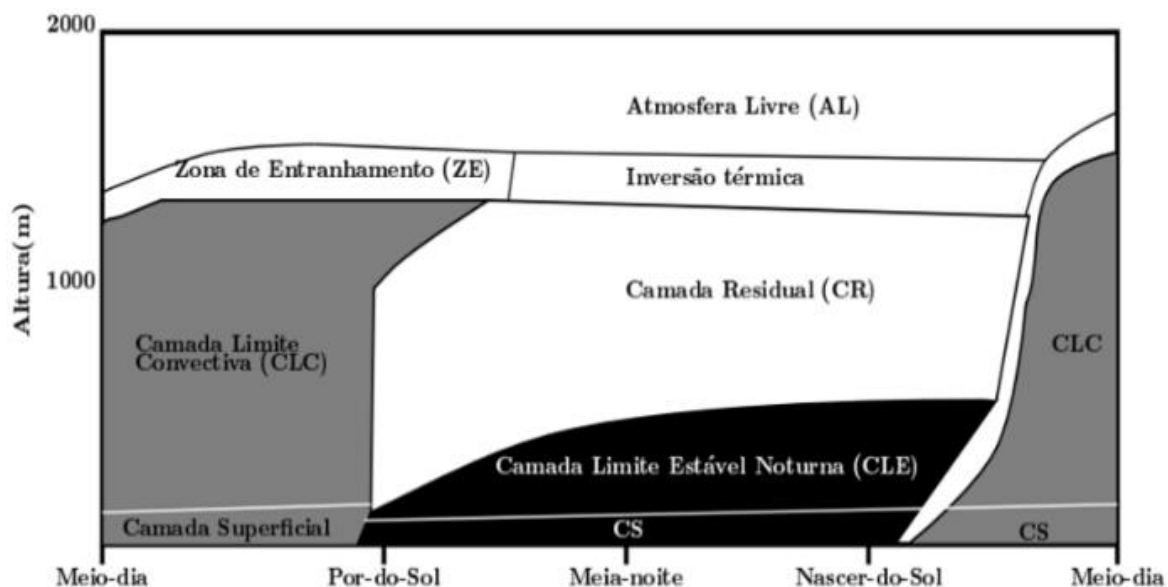


Fonte: Varejão-Silva (2006)

A troposfera também pode ser decomposta em duas partes, a Camada Limite Planetária (CLP), que compõe a região da superfície da Terra até uma faixa de 500 m a 3000 m de altitude, e a atmosfera livre que contempla o restante da troposfera (LOECK, 2014).

A Camada Limite Planetária é definida como a parte mais baixa da troposfera, diretamente influenciada pela presença da superfície terrestre e seu alcance varia de metros até alguns quilômetros (STULL, 1988; WALLACE; HOBBS, 2006). A CLP é a faixa onde existe turbulência e que responde às forçantes superficiais, principalmente o aquecimento e resfriamento solar e cisalhamento horizontal do vento, em uma escala menor que 1 hora. Segundo Zanneti (1990), a turbulência na CLP é o principal fator na dispersão vertical dos poluentes.

**Figura 2-** Ciclo da Camada Limite Planetária



Fonte: Adaptado de Stull (1991) por Cardoso (2019)

No período diurno, a CLP é denominada Camada Limite Convectiva (CLC), considerada uma zona de mistura com muita turbulência, que é mantida principalmente pela convecção térmica. A CLC apresenta a maior extensão vertical, atingindo alguns quilômetros, e sendo dividida em três partes: Camada Limite Superficial, sendo a camada mais próxima da superfície e com espessura entre 5 a 10% da espessura da CLP (KAIMAL; FINNIGAN, 1994),



a Camada de Mistura, onde os gradientes verticais das propriedades são próximos de zero devido a intensa mistura turbulenta e a Camada de Entranhamento, região de transição entre a Camada de Mistura e a atmosfera livre, caracterizada pela grande variação nos gradientes verticais e por inversão térmica.

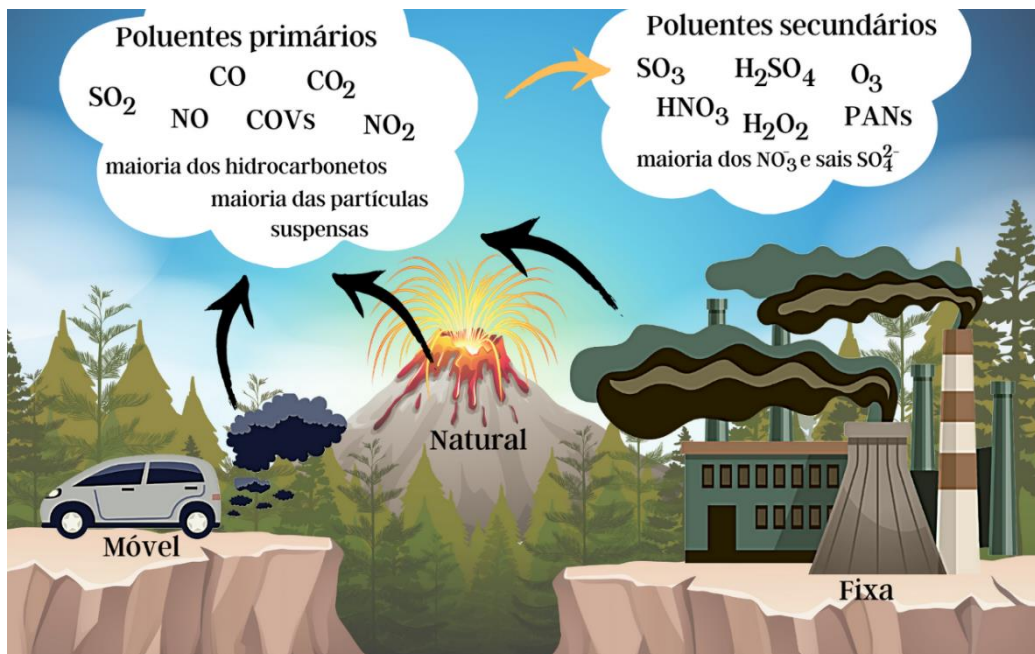
No período noturno, a CLP é denominada Camada Limite Estável (CLE) ou Camada Limite Noturna (CLN), apresentando menor extensão vertical, onde a turbulência é mantida pela produção mecânica devido ao cisalhamento do vento (GUERRA, 2008).

### **3.2 Poluição atmosférica**

A poluição atmosférica caracteriza-se como um fenômeno típico de regiões urbanas e industrializadas, sendo definida como mistura complexa e altamente variável de diferentes substâncias, as quais podem ocorrer na fase gasosa, líquida ou sólida, que em concentrações elevadas têm potencial de causar efeito negativo em seres humanos, animais, vegetação ou materiais (BRAGA *et al.*, 2005; MORAES, 2010; WHO, 2005). A poluição atmosférica ocorre quando há substâncias presentes no ar que, pela sua concentração, podem torná-lo impróprio à saúde, causando danos ao bem estar das pessoas e ao meio ambiente (CETESB, 2014). Tal degradação é proveniente da interação de diversos fatores, como as emissões das indústrias, automóveis e demais fontes emissoras, as características físico-químicas e as possíveis reações dos poluentes e as condições meteorológicas, que acabam por intensificar a poluição do ar com o lançamento de substâncias nocivas na atmosfera em grandes quantidades (IEMA, 2014).

A poluição atmosférica pode ser considerada em escala local, regional e global, dependendo do tempo de vida específico para cada poluente (ABDO ARBEX *et al.*, 2012). A qualidade do ar de um local sofre influência de um conjunto de fontes emissoras, que são divididas em duas categorias, fixas e móveis. As fontes fixas compreendem indústrias, emissões naturais, entre outros, enquanto as fontes móveis compreendem veículos automotores, aviões, trens, entre outros. A intensidade do lançamento dos gases, seu transporte e diluição na atmosfera, determinam o estado atual da qualidade do ar atmosférico (CUNHA, 2002).

**Figura 3-** Fontes de poluição atmosférica e tipos de poluentes



Fonte: do autor

### 3.3 Poluentes Atmosféricos

Segundo a Resolução CONAMA n. 491 de 2018, poluente atmosférico é:

Qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam 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.

Os poluentes são divididos em duas categorias, primários e secundários. Os poluentes primários são aqueles emitidos na atmosfera diretamente de uma fonte emissora, como chaminé ou escapamento. Dentre os poluentes primários estão inclusos dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e compostos orgânicos voláteis (COVs). As emissões desses poluentes podem ser medidas diretamente na fonte (ABDO ARBEX *et al.*, 2012).

Os poluentes secundários, por sua vez, são formados a partir de reações químicas entre poluentes primários, outros secundários e envolvendo componentes naturais da atmosfera, como água e oxigênio. Os poluentes secundários envolvem ozônio (O<sub>3</sub>), um dos poluentes mais estudados, devido à sua alta toxicidade e abundância (BRUNEKREEF; HOLGATE, 2002) e nitrato de peroxiacetila (PANs). Pelo fato de serem formados a partir de reações químicas, que dependem de variáveis como presença de radiação solar e deslocamento das massas de ar para ocorrer, não há uma forma de medi-los na fonte ou de precisar qual fonte deu origem àquele poluente em determinada localidade.

O aumento no desenvolvimento econômico de uma região acarreta o aumento de indústrias e trânsito de pessoas, o que leva a um acréscimo considerável no número de fontes fixas e móveis (GUARIEIRO; VASCONCELLOS; SOLCI, 2011). Tal fator ocasiona o aumento da concentração dos poluentes, decorrentes principalmente da queima de combustíveis fósseis, contribuindo para a degradação ambiental e redução da qualidade de vida da população.

Atualmente há um grande reconhecimento internacional da seriedade e da eficiência da indústria siderúrgica brasileira por sua crescente competitividade, preocupação com o meio ambiente, estrutura de produção e domínio tecnológico. Ainda assim, as usinas produtoras de aço, em função de seus processos, são consideradas grandes atividades poluidoras, e têm como efeitos a poluição de corpos hídricos, emissão de gases causadores do efeito estufa e poluentes atmosféricos que podem causar diversos problemas à saúde humana (BRITO, 2015; ROCHA; GUIMARÃES, 2017; SOUZA, 2013). Em todos esses processos, as principais emissões são de material particulado, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio (LIMA; ELEBRAS-VEIGA, 2015; REMUS *et al.*, 2013).

A atividade antrópica acaba por intensificar a poluição do ar com o lançamento contínuo de grandes quantidades de substâncias nocivas. As atividades industriais levam à produção de diversos gases que se dispersam na atmosfera, alterando a sua composição e influenciando na qualidade do ar. Além disso, quando a concentração dos gases se apresenta em níveis elevados, estes produzem efeitos nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente. A magnitude do lançamento das emissões das fontes estacionárias, o transporte e a diluição na atmosfera determinam o estado atual da qualidade do ar (BRAGA *et al.*, 2005).

No Brasil, os padrões de qualidade do ar são regulamentados pela resolução CONAMA 491 de 2018, a qual estabelece os limites para os poluentes monitorados de acordo com o

Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), que define a redução gradual dos limites de emissão, até que se atinja o padrão adotado pela OMS. Os padrões de qualidade do ar podem ser observados na Tabela 1. Atualmente, os limites observados são os encontrados no PI-1, que apresentam valores de referência muito mais permissivos que o Padrão Final.

**Tabela 1-** Padrões de Qualidade do Ar CONAMA 491/2018

Poluentes Atmosféricos	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm
Material Particulado - MP <sub>10</sub>	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sub>1</sub>	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP <sub>2.5</sub>	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual <sub>1</sub>	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO <sub>2</sub>	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual <sub>1</sub>	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO <sub>2</sub>	1 hora <sub>2</sub>	260	240	220	200	-
	Anual <sub>1</sub>	60	50	45	40	-
Ozônio - O <sub>3</sub>	8 horas <sub>3</sub>	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sub>1</sub>	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	-	-	-	-	9
Partículas totais em suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual <sub>4</sub>	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb <sub>5</sub>	Anual <sub>1</sub>				0,5	-

1- Média aritmética anual

2- Média horária

3- Máxima média móvel obtida no dia

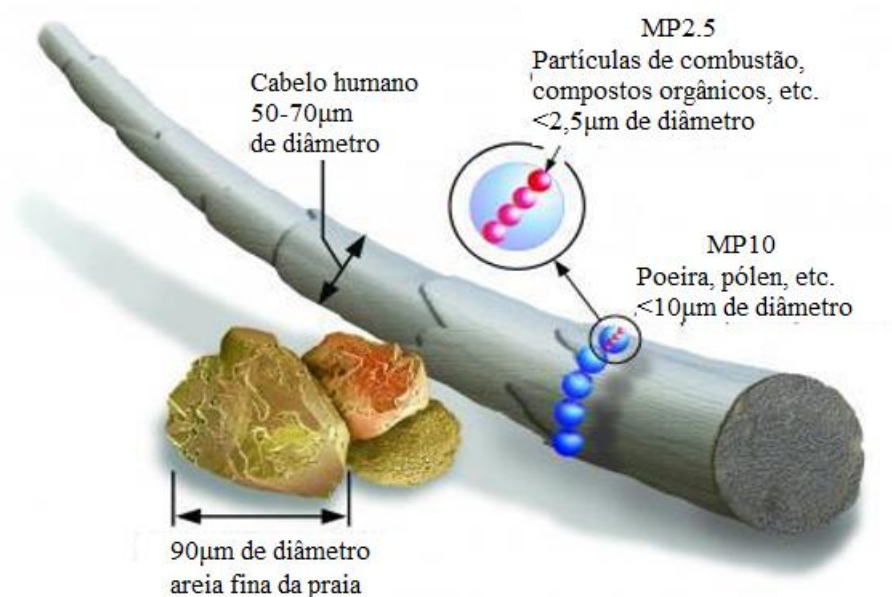
4- Média geométrica anual

5- Medido nas partículas totais em suspensão

### 3.3.1 Material Particulado

O material particulado é uma mistura complexa de partículas sólidas e líquidas capazes de permanecer em suspensão, podendo ter origem nos processos de combustão ou em decorrência de fenômenos naturais e capaz de causar efeitos adversos à saúde que variam em grau e tipo, de acordo com tamanho aerodinâmico da partícula (WHO, 2005, 2016). Se incluem no material particulado fuligem, poeira, sujeira, gotículas de líquido e fumaça. Estes variam em tamanho, composição e concentração, de acordo com fatores como a fonte de origem, estação do ano e localização geográfica, podendo ser classificados pelo tamanho ou composição. Os mais comumente utilizados em estudos de poluição atmosférica e pelos Órgãos de regulamentação ambiental são MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>, que correspondem, respectivamente, ao material particulado menor que 10 µm de diâmetro e material particulado menor que 2,5 µm de diâmetro (ABDO ARBEX *et al.*, 2012; HEI, 2002). O material particulado é um dos poluentes atmosféricos mais estudados, especificamente suas relações com a saúde pública (ANDREÃO; DE ALMEIDA ALBUQUERQUE, 2020; DE MIRANDA *et al.*, 2012; SALDIVA, PAULO H.N. *et al.*, 1995; TACIANA *et al.*, 2019). Outra especificidade de tal poluente se estabelece por sua origem que pode ser primária ou secundária.

**Figura 4-** Comparação entre tamanhos de material particulado

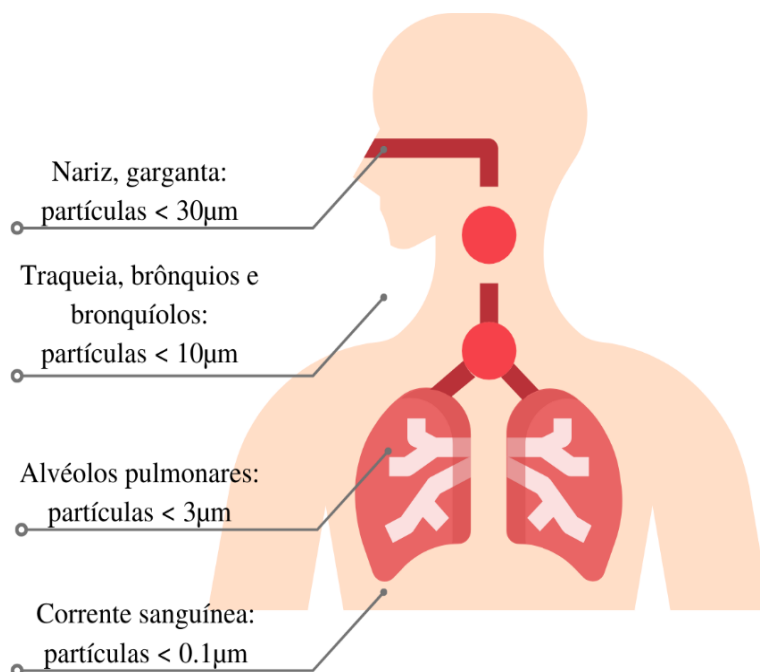


Fonte: Adaptado de <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>

As partículas podem permanecer em suspensão no ar durante longos períodos. Algumas partículas podem ser vistas na forma de fuligem ou fumaça, enquanto outras podem ser detectadas apenas através do uso de microscopia eletrônica.

As partículas maiores que  $30\ \mu\text{m}$  de diâmetro comumente são retidas pelo nariz, boca ou garganta, enquanto as partículas menores que  $10\ \mu\text{m}$  de diâmetro tendem a ser depositadas nas vias aéreas superiores - traqueia, brônquios e bronquíolos. Partículas com até  $3\ \mu\text{m}$  podem se depositar nos alvéolos pulmonares e as partículas denominadas ultrafinas, que são menores que  $0,1\ \mu\text{m}$  de diâmetro, se depositam em tecidos pulmonares, podendo atingir a corrente sanguínea, como exemplificado na Figura 5.

**Figura 5-** Nível de deposição de poluentes no organismo



Fonte: do autor

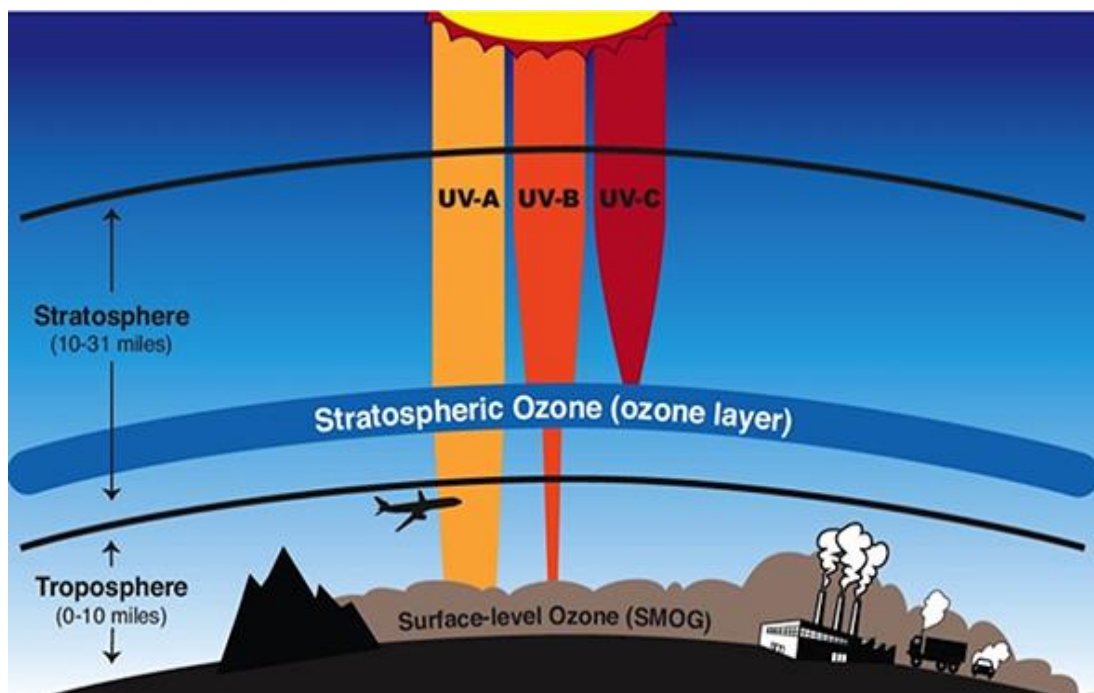
### 3.3.2 Ozônio

O ozônio, quando na estratosfera, é um composto benéfico e de suma importância, que protege a vida na Terra filtrando comprimentos de onda solar mais energéticos, UV-B e UV-C. Junto das moléculas de oxigênio são capazes de absorver entre 95 e 99,9% da radiação que chega ao planeta. Além de altamente reativo e tóxico, absorve radiações ultravioleta e

infravermelho, contribuindo para o efeito estufa. No processo de absorção dos raios UV, gera átomos de oxigênio reativos, que formam OH (radical hidroxila), um oxidante atmosférico bastante importante nas dinâmicas e nas reações químicas (FINLAYSON-PITTS; PITTS JR., 1999).

O ozônio possui também um papel fundamental na química da troposfera. Este é considerado um poluente exclusivamente secundário, oxidante fotoquímico, formado a partir da reação química entre outros poluentes, como óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e compostos orgânicos voláteis (COVs) e catalisada pela radiação solar. A concentração de ozônio em um local é influenciada por fatores como concentração de  $\text{NO}_2$ , COVs, intensidade da radiação solar e condições meteorológicas. Schonbein reconheceu o ozônio como um potente irritante pulmonar em 1851, logo após a primeira síntese do composto (BATES, 1989).

**Figura 6-** Camada de Ozônio e radiação solar



Fonte: NASA

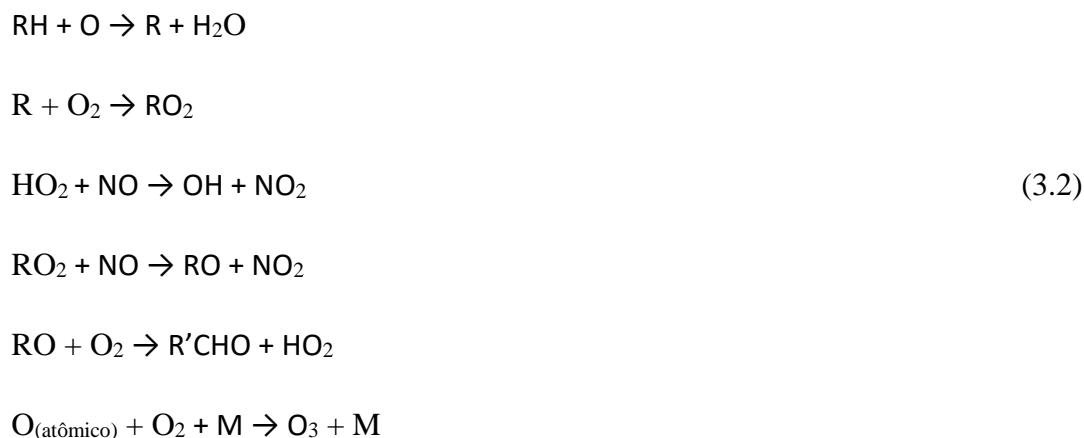
A fonte de emissões antropogênicas dos precursores de ozônio mais preocupante é a proveniente de frotas veiculares. Estima-se que na Europa as fontes veiculares representem 40,5% das emissões de  $\text{NO}_x$  e 15,6% das emissões de COVs. Enquanto isso, a Agência Nacional de Proteção Ambiental dos Estados Unidos estima que 61,9% das emissões de  $\text{NO}_x$  e 45,2%

das emissões de COVs nos Estados Unidos estão relacionadas às frotas veiculares no país (GALVÃO, 2014; NETTO *et al.*, 2017). Para o município de Belo Horizonte, de acordo com dados do inventário de emissões e poluentes atmosféricos, a frota veicular de Belo Horizonte é responsável por 95,2% das emissões de NO<sub>x</sub> (FEAM, 2014).

O ozônio troposférico incide de reações fotoquímicas, o que indica que as radiações solares têm papel essencial nas reações (FINLAYSON-PITTS; PITTS JR., 1999). A única fonte antropogênica de ozônio troposférico que se tem conhecimento é a fotólise do NO<sub>2</sub>. O processo de formação do ozônio é complexo, mas pode ser simplificado de acordo com a seguinte reação:



O ozônio também pode ser formado a partir da degradação dos COVs. Os compostos orgânicos voláteis participam dessa reação na oxidação do NO, usualmente emitido de motores e combustões, em NO<sub>2</sub>, o precursor do ozônio, em reação não lineares. De maneira simplificada, a reação que ocorre pode ser descrita da seguinte forma:



Em que  $h\lambda$  é a radiação solar, RH são hidrocarbonetos, R'CHO são carbonilas e M são moléculas inertes, na maior parte o N<sub>2</sub>.

Além da formação fotoquímica, há uma forma menos comum de aparecimento de ozônio, a difusão de ozônio da estratosfera para a troposfera (FINLAYSON-PITTS; PITTS JR., 1999). Tal processo é tido como provável responsável por menos da metade do ozônio encontrado no hemisfério norte (WHO, 2006). Há ainda reações de longo prazo envolvendo



metano e monóxido de carbono, poluentes importantes e com alta permanência na atmosfera (WHO, 2006).

A formação de ozônio é intensamente influenciada por condições meteorológicas e topográficas. Diversos estudos já analisaram casos específicos em grandes regiões urbanas pelo mundo (NETTO *et al.*, 2017). Os estudos também mostraram variações cíclicas diárias e sazonais nos níveis dos poluentes. Isso pôde ser observado em um estudo realizado em São Paulo (NOGUEIRA *et al.*, 2014). O padrão de formação do ozônio tem altos índices em meses mais quentes, por estar relacionado à radiação solar, onde os níveis de O<sub>3</sub> persistem por mais tempo. Enquanto isso, meses com maior incidência de chuvas tem uma redução na radiação solar, por conta da maior frequência de nuvens.

Estudos recentes têm mostrado que a concentração hemisférica de ozônio troposférico tem aumentado. A magnitude dos efeitos adversos à saúde humana depende da concentração, atividade durante a exposição e duração da exposição (SOLBERG *et al.*, 2005).

### **3.4 Saúde Pública**

A boa qualidade do ar é indispensável para o bem-estar humano, sendo um requisito básico da saúde humana (WHO, 2006). A poluição do ar é causa de aumento de morbidade e mortalidade, apresentando risco para toda a população, visto que todas as pessoas podem vir a estar expostas a tais contaminantes. A diminuição da qualidade do ar causa prejuízos à saúde humana, que variam desde tosse, fadiga, náuseas, inflamação do sistema cardiorrespiratório, asma, danos ao cérebro, nervos, doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), câncer de pulmão, influência no desenvolvimento do feto e até mesmo morte prematura (CANÇADO *et al.*, 2006; HAMRA *et al.*, 2014; JÜNGER *et al.*, 2005; LOOMIS *et al.*, 2013; WHO, 2006). Além disso, está relacionada a problemas ambientais como deposição ácida, destruição da camada de ozônio e efeito estufa.

O clima e as condições de tempo influenciam a concentração dos poluentes, comprometendo a saúde da população direta e indiretamente (DANNI-OLIVEIRA; BACONYI, 2003). As baixas temperaturas e umidade relativa influenciam diretamente nos efeitos à saúde, além de suscitar uma atmosfera desfavorável para a dispersão dos poluentes, podendo afetar a população de forma indireta devido à alta concentração de poluentes.

Variações na taxa de morbidade e mortalidade também estão relacionadas às variações nas concentrações diárias e horárias dos poluentes (FISCHER *et al.*, 2011).

As principais fontes e características dos poluentes atmosféricos reportados pela CETESB e os efeitos principais causados à saúde humana pelos poluentes reportados pela OMS se encontram na Tabela 2. Tais efeitos dependem de fatores como tempo de exposição do poluente, magnitude e frequência da exposição, tipo e tamanho do poluente, tipo de atividade que a pessoa exerce, o local de moradia, de trabalho e vulnerabilidade do indivíduo (WHO, 1999). O nível de profundidade na deposição do poluente no trato respiratório varia com o tamanho da partícula. Quanto menor a partícula, mais profundamente o poluente penetra no sistema respiratório. O grau de absorção do poluente atmosférico também está relacionado com sua solubilidade em água, quanto mais insolúvel, maior o nível de penetração destes poluentes no trato respiratório (KÜNZLI; PEREZ; RAPP, 2010).

**Tabela 2-** Informações sobre poluentes atmosféricos e seus efeitos na saúde humana

Poluente	Características	Fontes Principais	Efeitos à saúde
Partícula Inalável fina (MP <sub>2,5</sub> )	Partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc., que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias. Faixa de tamanho < 2,5 µm.	Processos de combustão (industrial, veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera) como sulfato e nitrato, entre outros.	Irritação nos olhos, nariz e garganta, infecções respiratórias e câncer de pulmão. Os efeitos dependem do tamanho da partícula e, em casos de exposição aguda, provoca problemas cardiovasculares especialmente quando associados a compostos inorgânicos, como traços de metais.
Partícula Inalável (MP <sub>10</sub> )	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 10 µm.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), poeira ressuspensa, aerossol secundário (formado na atmosfera).	

<p>Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)</p>	<p>Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. Pode ser transformado a SO<sub>3</sub> que na presença de vapor de água, passa rapidamente a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.</p>	<p>Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa e papel, fertilizantes.</p>	<p>Exposição aguda: irritação nos olhos, garganta, nariz e trato respiratório, tosse, enfraquecimento da função pulmonar e aumento da frequência de ataques asmáticos. Exposição crônica: aumento de bronquite crônica, agravo de doenças cardiovasculares, doenças respiratórias em crianças e aumento da morbidade em todas as idades, internações por doenças cardíacas e aumento da mortalidade prematura (ARTAXO, 1991; TADANO, 2012)</p>
<p>Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>)</p>	<p>Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.</p>	<p>Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.</p>	<p>Exposição aguda: irritação dos olhos, nariz e garganta, redução da função pulmonar e aumento de infecções respiratórias em crianças, enfisema e edema pulmonar, bronquite e agravamento de doenças respiratórias (EPA, 2020). Exposição crônica: redução da capacidade pulmonar em crianças, aumento da susceptibilidade a infecções virais, irritação das vias respiratórias e pulmões, agravamento de quadros de bronquite, enfisema e doenças cardíacas existentes, aumento de internações hospitalares e mortalidade prematura (ABDO</p>

			ARBEX <i>et al.</i> , 2012; ARTAXO, 1991)
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	Pode ser combinado facilmente com a hemoglobina, interferindo na capacidade de oxigenação do sangue, atuando como asfixiante sistêmico, prejudicando a acuidade visual, a atividade mental e causando retardamento dos reflexos, podendo causar a morte mesmo em exposição à baixa concentração (ARTAXO, 1991; TADANO, 2012)
Ozônio (O <sub>3</sub> )	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente para a atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Irritação dos olhos, mucosa nasal e faringe. Provoca tosse, redução da função pulmonar em pessoas asmáticas, inflamação e obstrução das vias respiratórias, alterando o rendimento e aumentando as morbidades respiratórias em crianças.

Os efeitos da poluição podem ser notados como um aumento no risco a uma pessoa ou população, ou como um efeito clínico. Todas as perspectivas são importantes para as pesquisas e interpretação dos dados e a severidade dos sintomas não depende apenas da concentração de poluentes a qual o paciente foi exposto, mas também da sensibilidade do organismo deste. Deve-se levar em conta também que a suscetibilidade do indivíduo depende de comorbidades existentes, idade, sexo e fatores genéticos, informações que, na maioria dos casos, não estão disponíveis para serem avaliadas durante os estudos.

Dentre os grupos mais suscetíveis estão as crianças, que apresentam frequência respiratória maior que as dos adultos (ABDO ARBEX *et al.*, 2012; BRAGA, A. *et al.*, 2001),

idosos e pessoas com comorbidades cardíacas ou respiratórias crônicas (ABELSOHN *et al.*, 2002; ROGUIN *et al.*, 2000). A exposição de crianças aos poluentes é delicada pois estas ainda não estão com os pulmões e sistema imunológico totalmente desenvolvidos, podendo apresentar respostas diferentes dos adultos quando expostos a uma mesma situação (SCHWARTZ, 2004).

A literatura biomédica apresenta diversos estudos acerca dos efeitos agudos da poluição do ar sobre a saúde. Dentre eles, são dadas maior ênfase nos seguintes desfechos: mortalidade e admissões hospitalares (BRUNEKREEF; HOLGATE, 2002).

No Brasil, a maior parte dos estudos realizados tiveram como foco as grandes metrópoles, principalmente em São Paulo. Dentre eles estão estudos sobre variáveis meteorológicas e poluição do ar e sua associação com internações respiratórias em crianças (DE MORAES *et al.*, 2019), incidência de câncer no trato respiratório e mortalidades associados a densidade no tráfego (RIBEIRO *et al.*, 2018), fator de risco para câncer de pulmão (FAJERSZTAJN *et al.*, 2013), efeitos à saúde de crianças e adolescentes (BAKONYI *et al.*, 2004; BRAGA, A. L. F. *et al.*, 2001; GOUVEIA; FLETCHER, 2000; NASCIMENTO, L. F. C. *et al.*, 2006).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que a poluição do ar causa aproximadamente 7 milhões de mortes por ano, sendo que 9 a cada 10 pessoas respiram ar contendo níveis elevados de poluentes. No Brasil, em 2016 foram 44.228 mortes decorrentes da poluição do ar, o que acarretou um custo com internações maior que R\$ 1,3 bilhão, segundo o relatório Saúde Brasil 2018, do Ministério da Saúde. No relatório comenta-se ainda o aumento da exposição ao O<sub>3</sub> em todo o território nacional, principalmente nos grandes centros urbanos e estados castigados pelas queimadas.

Os dados de saúde pública no Brasil são coletados pelo DATASUS – Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde do Brasil, contando com os dados de todos os hospitais credenciados ao SUS, sendo estes públicos ou privados. O DATASUS administra informações de saúde, como informações epidemiológicas, rede de assistência à saúde, informações demográficas, socioeconômicas e informações financeiras. Este é responsável por coletar, processar e disseminar os dados de saúde pública. As informações coletadas são tratadas e disponibilizadas na plataforma TabNet (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021) para uso público, contendo todas as informações acerca das admissões hospitalares nas redes credenciadas.

Apesar desta ser uma ferramenta de suma importância na realização dos estudos epidemiológicos, há limitações como o fato de não haver dados para todos os hospitais da localidade e até mesmo muitos dados faltantes durante os anos.

### 3.5 Análises Estatísticas

#### 3.5.1 Regressão Linear Múltipla

A regressão linear múltipla é uma técnica de regressão multivariada, cuja finalidade está em obter uma relação matemática em uma situação na qual a reta ajustada não descreve bem o conjunto de dados, passando a levar em consideração outras variáveis independentes que possam influenciar no valor da variável dependente Y.

O modelo mais simples relacionando a resposta Y a uma variável quantitativa independente X é a equação da reta (VENABLES; RIPLEY, 2002):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (3.3)$$

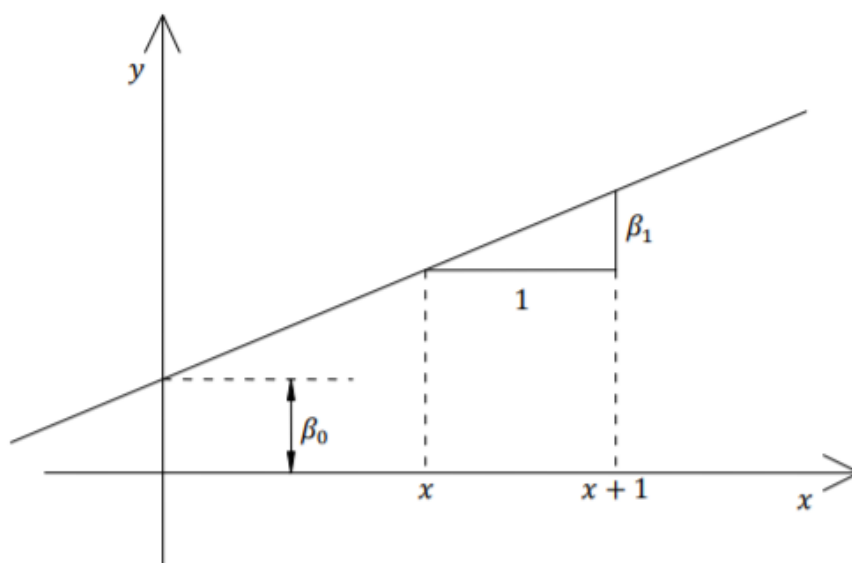
Onde  $\beta_0$  é o ponto intercepto da variável dependente, e  $\beta_1$  é a inclinação da reta (taxa de variação de Y por unidade de X), chamados de constantes. As variáveis X descrevem o sistema e permitem a detecção de padrões de similaridade, associação e correlação entre as variáveis.

A inclusão de novas variáveis no modelo pode ser realizada para aumentar o grau de correlação entre os dados teóricos e os reais. Neste caso, a equação se apresenta da seguinte forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon x \quad (3.4)$$

Onde  $\beta_p$  é o coeficiente relacionado à p-ésima variável,  $X_p$  é a p-ésima variável observada e  $\varepsilon$  é o erro associado à distância entre o valor de Y e correspondente valor estimado  $\hat{Y}$ , que permite explicar a variabilidade existente em Y e que não é explicada por X.

**Figura 7-** Interpretação geométrica dos parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$



Fonte: Rodrigues, 2012

Um parâmetro importante na descrição de um modelo de regressão é o coeficiente de determinação  $R^2$ . Este coeficiente é utilizado para quantificar a capacidade do modelo em explicar a resposta  $Y$  através das variáveis  $X_p$  e pode ser descrito pela seguinte equação:

$$R^2 = \frac{\text{variação explicada}}{\text{variação total}} = \frac{SQR}{SQT} = 1 - \frac{SQE}{SQT} \quad (3.5)$$

Onde,

$$SQT = SQR + SQE \Leftrightarrow$$

$$\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=0}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.6)$$

Sendo as variáveis da equação referidas à análise de variância ANOVA, de acordo com a Tabela 3.

**Tabela 3-** Tabela de análise da variância (ANOVA)

Causas da variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F
Regressão	SQR	$p$	$QMR = \frac{SQR}{p}$	$F = \frac{QMR}{QME}$
Erro (resíduo)	SQE	$n - p - 1$	$QEM = \frac{SQE}{n - p - 1}$	
Total	SQT	$n - 1$		

O coeficiente de determinação está limitado entre 0 e 1. No entanto, é importante entender que o  $R^2=1$  não significa que o modelo de regressão tenha um bom ajuste nos dados, visto que a adição de variáveis aumenta o valor deste coeficiente mesmo que este pouco explique a variável resposta.

Por conta disso, é preferível que se utilize o coeficiente de determinação ajustado, que se trata de uma medida ajustada do coeficiente de determinação onde o acréscimo de variáveis pouco explicativas penaliza o valor de  $R^2_{ajust}$ . Desta forma, se há uma diferença significativa entre  $R^2$  e  $R^2_{ajust}$ , possivelmente há no modelo variáveis estatisticamente não significativas. O coeficiente de determinação ajustado é expresso na forma da seguinte equação:

$$R^2_{ajust} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-(p+1)}\right)(1 - R^2) \quad (3.7)$$

Onde  $n$  é o número de termos no modelo e  $p$  o número de dados.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

Este trabalho foi realizado utilizando dados do município de Belo Horizonte. O município é o 6º mais populoso do Brasil e o 3º da região sudeste brasileira, de acordo com os dados do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Possui uma população estimada de 2.521.564 habitantes no ano de 2020, além de uma área territorial de 331,354 km². No ano

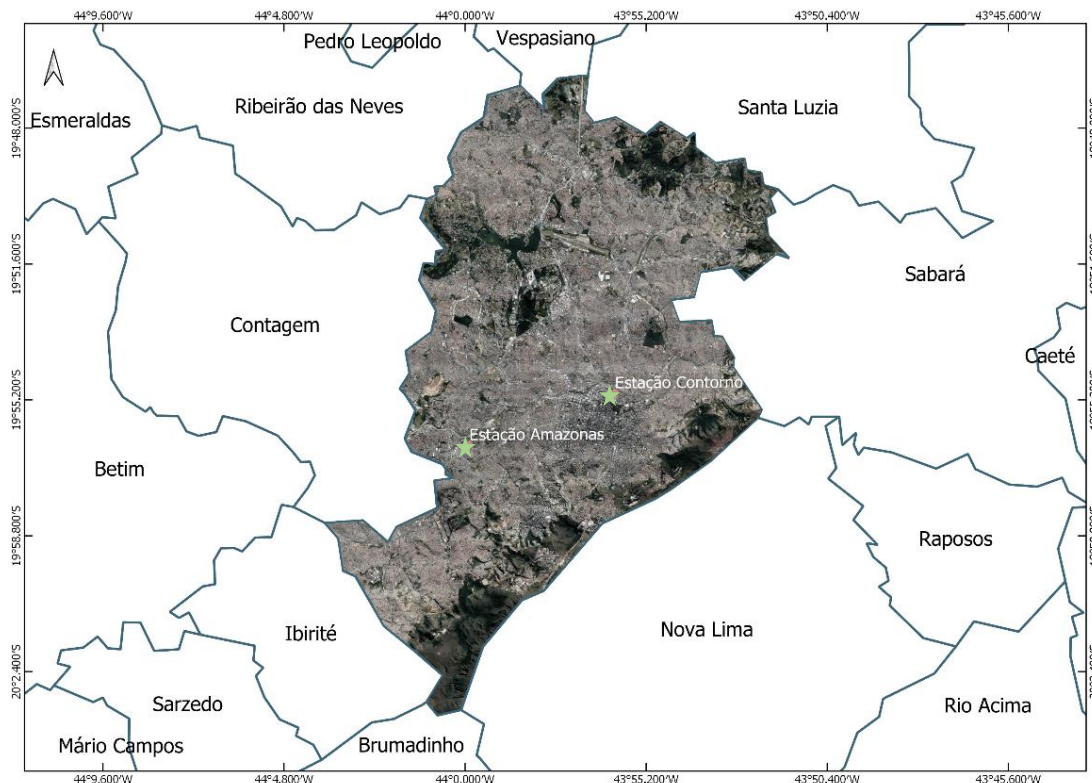


de 2018 teve um PIB per capita de R\$ 36.759,66, sendo a cidade mais rica do estado e a quarta mais rica do país, em PIB nominal. Apresenta clima subtropical, com verão chuvoso e inverno seco. No âmbito da saúde, Belo Horizonte registrou um total de 15.545 óbitos no ano de 2016, sendo 11,2% ocasionadas por problemas no aparelho respiratório. No ano seguinte, foram 11.779 óbitos, onde 10,8% correspondem a problemas no aparelho respiratório (IBGE, 2020). A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) é composta por 34 municípios, predominantemente urbana e destaca-se pelo elevado número de indústrias, especialmente as do setor metalúrgico, minerário, com grande quantidade de minas de ouro, manganês, ferro e calcário, petroquímicas e de fabricação de automóveis. Além disso, a RMBH conta com uma frota de mais de 2,9 milhões de veículos (DE MIRANDA *et al.*, 2012).

#### **4.2 Dados de variáveis ambientais e Saúde Pública**

Para a realização do estudo foram obtidos dados de variáveis ambientais e meteorológicas através das estações de monitoramento da qualidade do ar de Belo Horizonte, disponibilizados pela FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente. Os dados estão disponíveis em resultados médios horários, a partir dos quais foram calculadas as concentrações médias mensais dos poluentes atmosféricos de interesse - ozônio (O<sub>3</sub>), material particulado 10 µm (MP<sub>10</sub>) e material particulado 2,5 µm (MP<sub>2,5</sub>), além da temperatura (T), precipitação (PP), direção do vento (wd, do inglês wind direction) e velocidade do vento (ws, do inglês wind speed). O município dispõe de duas estações automáticas de monitoramento, denominadas (i) Estação Contorno (43°55'01.93"O; 19°57'15.46"S) e (ii) Estação Amazonas (43°53'55.11"O; 19°54'40.01"S). Para ambas foram utilizados os dados compreendidos entre janeiro de 2015 e dezembro de 2019.

**Figura 8-** Mapa geográfico da região metropolitana de Belo Horizonte destacando a localização das estações de monitoramento da qualidade do ar do município de Belo Horizonte - estação Contorno e estação Amazonas.



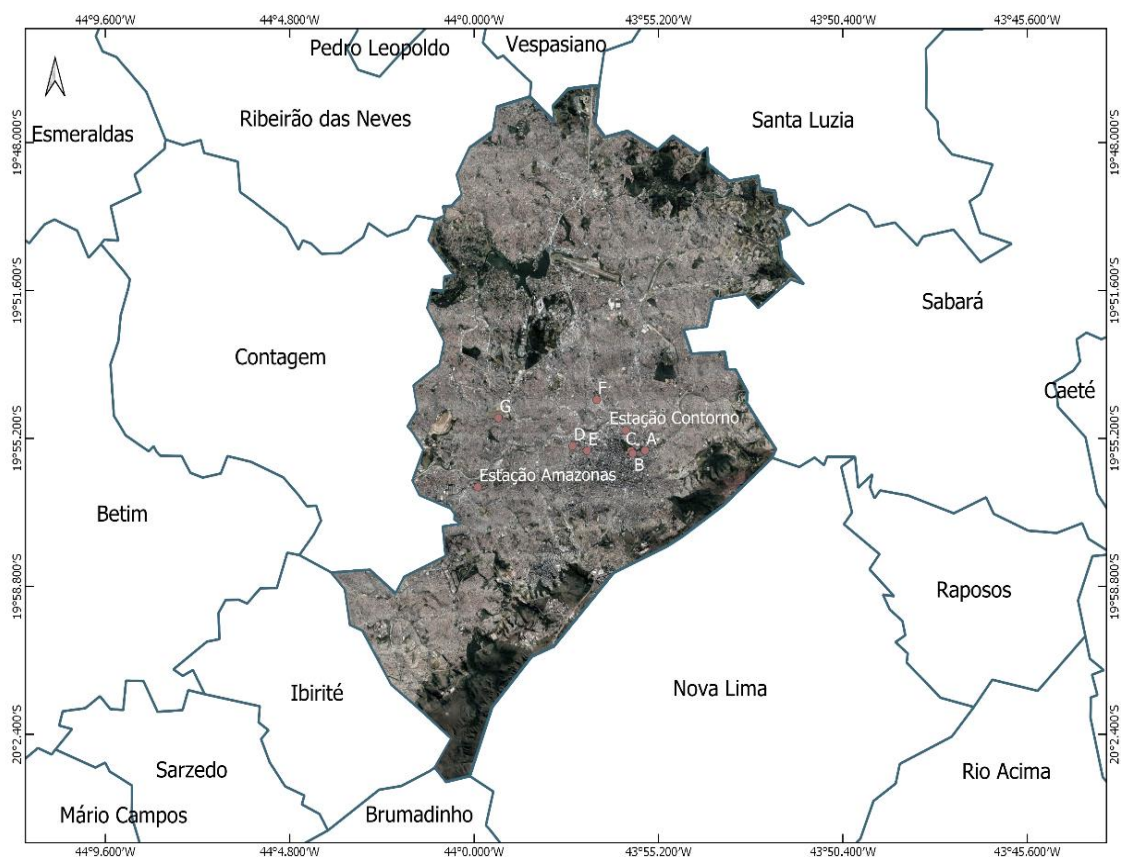
Fonte: do autor

Foram utilizados também dados hospitalares, obtidos na plataforma TabNET do DATASUS - Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde, de acordo com um raio arbitrário de 5 km de distância de cada uma das estações de monitoramento de qualidade do ar utilizadas para o estudo. Foram então analisados os dados de todos os hospitais dentro deste raio médio e aqueles cujas informações se apresentavam de forma completa para o período analisado foram selecionados.

Desta forma foram considerados sete hospitais: (a) Santa Casa, (b) João XXIII, (c) João Paulo II, (d) Felício Rocho, (e) Universitário de Ciências Médicas, (f) Odilon Behrens e (g) Alberto Cavalcanti. Dos hospitais que se enquadraram para o estudo, foram selecionadas as informações a partir do local de internação referentes às doenças do aparelho respiratório no CID-10 Capítulo X, para o período de 2015 a 2019, de pacientes admitidos tanto através de convênios quanto pelo Sistema Único de Saúde.

Visto que o Capítulo X também trata de doenças respiratórias que não apresentam ligação com o objetivo da análise, como exemplo a pneumoconioses ou influenza por vírus da gripe aviária, foram selecionadas as doenças da lista de morbidades do CID-10 que poderiam ter relações com os poluentes. No entanto, nem todas as morbidades se apresentavam na plataforma, por isso foram considerados os dados das seguintes: faringite aguda e amigdalite aguda, laringite e traqueíte agudas, pneumonia, bronquite aguda e bronquiolite aguda, sinusite crônica, bronquite, enfisema e outras doenças pulmonares obstrutivas crônicas, asma, outras infecções agudas das vias aéreas superiores e outras doenças do aparelho respiratório.

**Figura 9-** Mapa geográfico da região metropolitana de Belo Horizonte, destacando as estações de monitoramento da qualidade do ar do município de Belo Horizonte – Contorno e Amazonas, além da localização dos hospitais utilizados para o estudo - (a) Santa Casa, (b) João XXIII, (c) João Paulo II, (d) Felício Rocho, (e) Universitário de Ciências Médicas, (f) Odilon Behrens e (g) Alberto Cavalcanti.



Fonte: do autor

### 4.3 Tratamento dos dados

A curadoria dos dados relacionados às variáveis ambientais e da plataforma TabNet foi realizada a partir de linguagem de programação R. Assim como as análises estatísticas descritivas e multivariadas foram empregadas no mesmo a fim de validar e associar tais variáveis.

Para o tratamento e a análise estatística dos dados utilizou-se a versão 3.5.1 do R a partir da plataforma RStudio 1.1.463 (R CORE TEAM, 2019). A linguagem R consiste em uma linguagem de programação estatística, com código-fonte aberto, na qual é possível a realização de tratamentos estatísticos multivariados e manejo de dados (CARSLAW; ROPKINS, 2012; R CORE TEAM, 2019).

A entrada dos dados meteorológicos e de saúde pública foi realizada a partir de arquivos em formato .csv (*comma separated values*). Foi realizado tratamento básico nos dados de forma a separar as variáveis de interesse para os modelos, realização dos tratamentos estatísticos de correlação entre os parâmetros e construção de gráficos com auxílio do pacote *Openair* (CARSLAW; ROPKINS, 2012).

Acerca dos dados de qualidade do ar, analisaram-se as médias dos dados, de acordo com os períodos de referência para cada poluente atmosférico, segundo a CONAMA 491/2018 (vide Tabela 5), além dos valores máximos e médias anuais (vide Tabela 4), de forma a analisar a extrapolação dos limites nos locais avaliados.

Além disso, foram realizadas análises com os dados horários de direção e velocidade do vento para todo o período do estudo, com o auxílio da plataforma Google Earth, de forma a visualizar espacialmente as potenciais fontes emissoras.

A fim de associar as variáveis ambientais e de saúde pública, foi realizada aplicação de regressões lineares múltiplas (pacote stats).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ultrapassagens dos Padrões de Qualidade do Ar

Durante o período compreendido no estudo foram observados 13,44% de dados faltantes para o material particulado grosso, 36,11% para o material particulado fino e 17,86% para ozônio.

Como pode ser observado na Tabela 4, considerando os limites estabelecidos pela OMS, apresentam-se ultrapassagens do limite para o material particulado grosso (MP<sub>10</sub>) na estação da Delegacia Amazonas para todo o período, enquanto para a estação Contorno apenas o ano de 2016 não apresentou extrapolação ao limite. Para material particulado 2.5 µm (MP<sub>2,5</sub>) todos os anos ficaram acima do limite na Contorno enquanto para a Amazonas apenas no ano de 2017 não há ultrapassagem. Pode-se notar um aumento nos valores máximos de MP<sub>10</sub> para a estação da Av. Contorno no decorrer dos anos, enquanto para a estação Amazonas o comportamento é contrário.

**Tabela 4-** Análise descritiva das variáveis atmosférica do município de Belo Horizonte. Valores máximos anuais de MP e máxima média móvel de 8h anual de O<sub>3</sub> para o período observado

Estação	Variáveis ambientais	PF	Ano				
			2015	2016	2017	2018	2019
Av. Contorno	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	100	57,11	44,04	75,53	111,85	81,55
	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	20	21,99	18,64	21,75	29,83	33,11
	MP <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	10	10,35	12,08	10,71	10,4	10,3
Del. Amazonas	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	100	138,44	89,93	156,49	163,85	307,11
	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	20	30,54	26,81	21,88	21,71	20,96
	MP <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	10	11,95	15,13	9,91	11,33	13,57

PF – Padrão de qualidade do ar final, estabelecido pela OMS

Fonte: do autor

Ao avaliar os resultados de acordo com os períodos de referência para cada poluente definido na CONAMA 491/2018, obteve-se um resultado de concentração máxima com média móvel de 8h por dia de O<sub>3</sub> na Contorno de 111,85 µg/m<sup>3</sup>. No entanto, esse foi o único valor extrapolado para esta estação em todos os anos observados. Para as outras variáveis nesta

estação foram observados 1688 resultados acima do limite para MP<sub>10</sub> e 1467 resultados acima para MP<sub>2.5</sub>

Para a estação Amazonas, foram observadas 130 ultrapassagens do limite para O<sub>3</sub>, 79 resultados acima para o MP<sub>10</sub> e 85 resultados para o MP<sub>2.5</sub>. Os resultados obtidos de acordo com o período de referência estabelecido pela CONAMA 491/2018 podem ser observados na Tabela 5.

**Tabela 5-** Valores máximos, médios e desvio padrão para as variáveis ambientais de acordo com o período de referência estabelecido na CONAMA 491/2018 para o período de 2015 a 2019

Estação	Variáveis ambientais	Período de Referência*	PF	Máx	Méd	Desvio Padrão
Av. Contorno	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	8 horas	100	111,85	19,11	13,11
	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	24 horas	50	148,98	25,15	15,44
	MP <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	24 horas	25	48,25	10,32	5,52
	T(°C)	24 horas	-	33,44	24,63	2,79
	UR (%)	24 horas	-	98,47	61,96	11,45
Del. Amazonas	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	8 horas	100	307,11	33,27	31,61
	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	24 horas	50	80,68	24,48	12,5
	MP <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	24 horas	25	52,65	12,18	7,25
	T(°C)	24 horas	-	29,77	22,67	2,72
	UR (%)	24 horas	-	98	64,11	10,72

Fonte: do autor

## 5.2 Influência do Transporte Atmosférico

A fim de avaliar a influência do transporte atmosférico a partir da direção e intensidade dos ventos, construiu-se a Figura 10.

No lado esquerdo da figura pode-se observar o mapa de Belo Horizonte e as cidades limítrofes, juntamente com as localizações de parte das indústrias localizadas nestes municípios, enquanto do lado direito está uma rosa dos ventos de poluentes, onde o centro é a

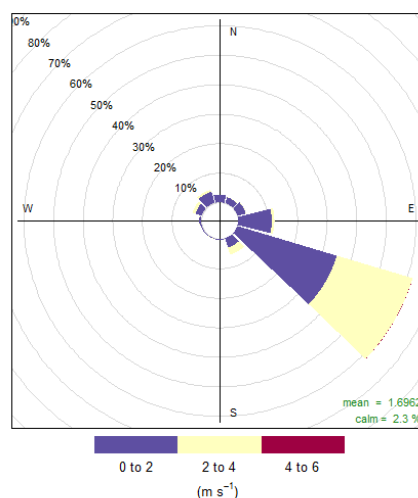
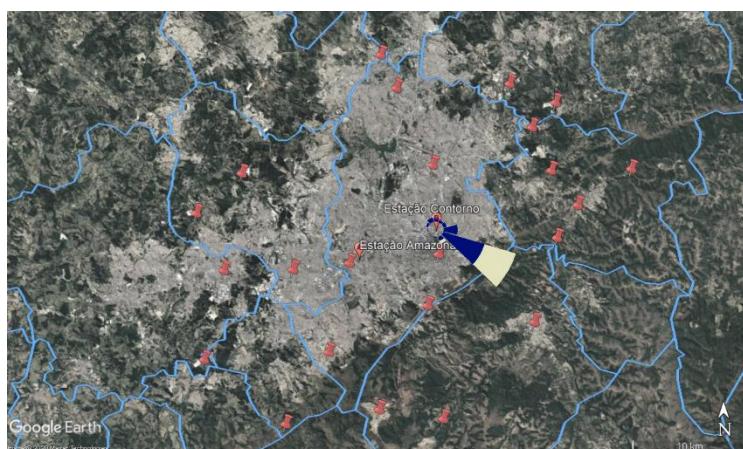
localização de cada uma das estações de monitoramento de qualidade do ar e a parte colorida representa a velocidade dos ventos que estão chegando da parte externa da rosa para o centro.

Observa-se que a Estação Contorno recebe influência de ventos provenientes somente da direção sudeste, o que diminui a influência do transporte de poluentes de regiões vizinhas, enquanto a Estação Amazonas observa-se a partir da rosa de ventos transporte de diversas regiões, majoritariamente de Leste e Sudeste. Especificamente nessas direções, encontram-se regiões com abundância de empreendimentos considerados de alto potencial poluidor, principalmente mineradoras e siderúrgicas.

Além disso, considerando como calmaria ventos com velocidade menor que 0,5 m/s, observa-se que apenas 2,3% do tempo para Contorno e 7,7% para Amazonas apresentaram velocidade quase nula, o que difere de São Paulo, por exemplo, onde podem ser observados períodos de 52% de calmaria (TACIANA *et al.*, 2019). Tal observação sugere a constante presença de transporte atmosférico da região industrial para a localidade das Estações de Qualidade do Ar de BH.

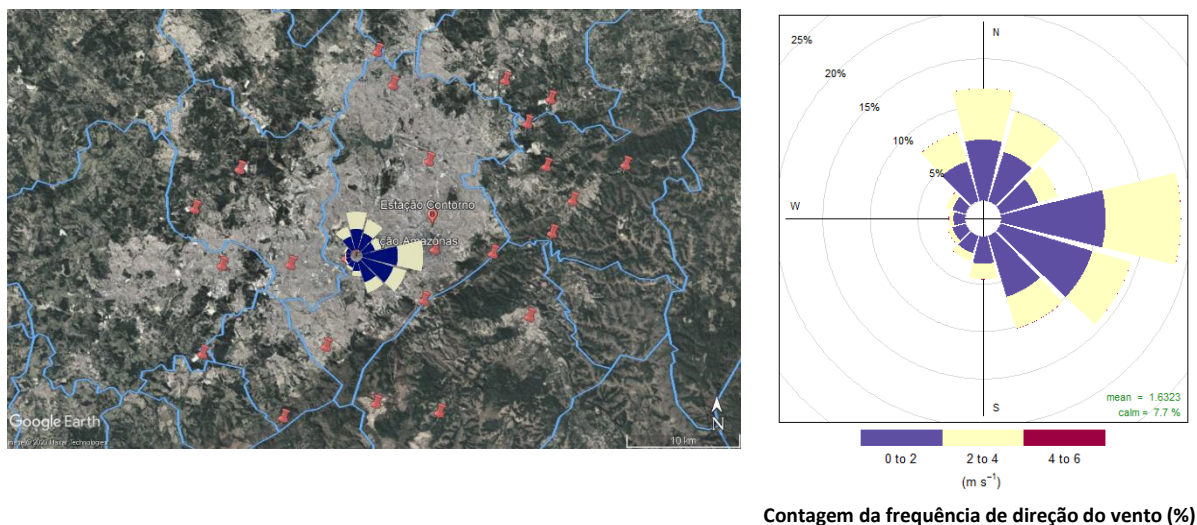
**Figura 10-** Mapa de Google Earth do município de Belo Horizonte e cidades limítrofes, contendo a localização das duas Estações de monitoramento da qualidade do ar, os pontos com maiores concentrações de indústrias e rosa dos ventos para (i) Estação Contorno e (ii) Estação Amazonas

(i) Estação Contorno



Contagem da frequência de direção do vento (%)

## (ii) Estação Amazonas



Fonte: do autor

A fim de avaliar o comportamento da formação de  $O_3$  nas Estações de Qualidade do Ar, construiu-se a Figura 11 a partir da direção dos ventos e concentração média horária do poluente. O ozônio apresentou um padrão no comportamento de formação, devido às reações para formação do ozônio troposférico (ver equações 3.1 e 3.2 – secção 3.3.2) que são fotoquímicas, ocasionando na formação diária desse poluente, durante os períodos em que há incidência direta de raios solares na superfície da Terra.

No entanto, é importante ressaltar que próximo a fontes de emissão de óxidos de nitrogênio o ozônio é suprimido pelas reações com o óxido nítrico em abundância (ver equações 3.1 e 3.2). Pode ser observado que mesmo que a oscilação na concentração de ozônio na estação do Contorno aparente ser maior ao longo do tempo na Figura 11, isso se dá pois a escala de variação é menor do que a escala na estação Amazonas, onde os níveis de ozônio atingem um patamar mais elevado. Cabe ressaltar ainda que na estação Contorno os valores máximo e médio foram respectivamente  $111,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $19,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , enquanto na Amazonas esses valores foram de  $307,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $33,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tais variações corroboram com os estudos pretéritos de que concentrações de ozônio em áreas de grande concentração de massa urbana são menores do que em áreas suburbanas e zonas rurais devido às altas concentrações óxido nítrico (WHO, 2016).

A Figura 11 pode ser interpretada da mesma forma que a rosa dos ventos da Figura 10, onde o centro representa a estação de monitoramento avaliada. Neste caso, pode-se observar o

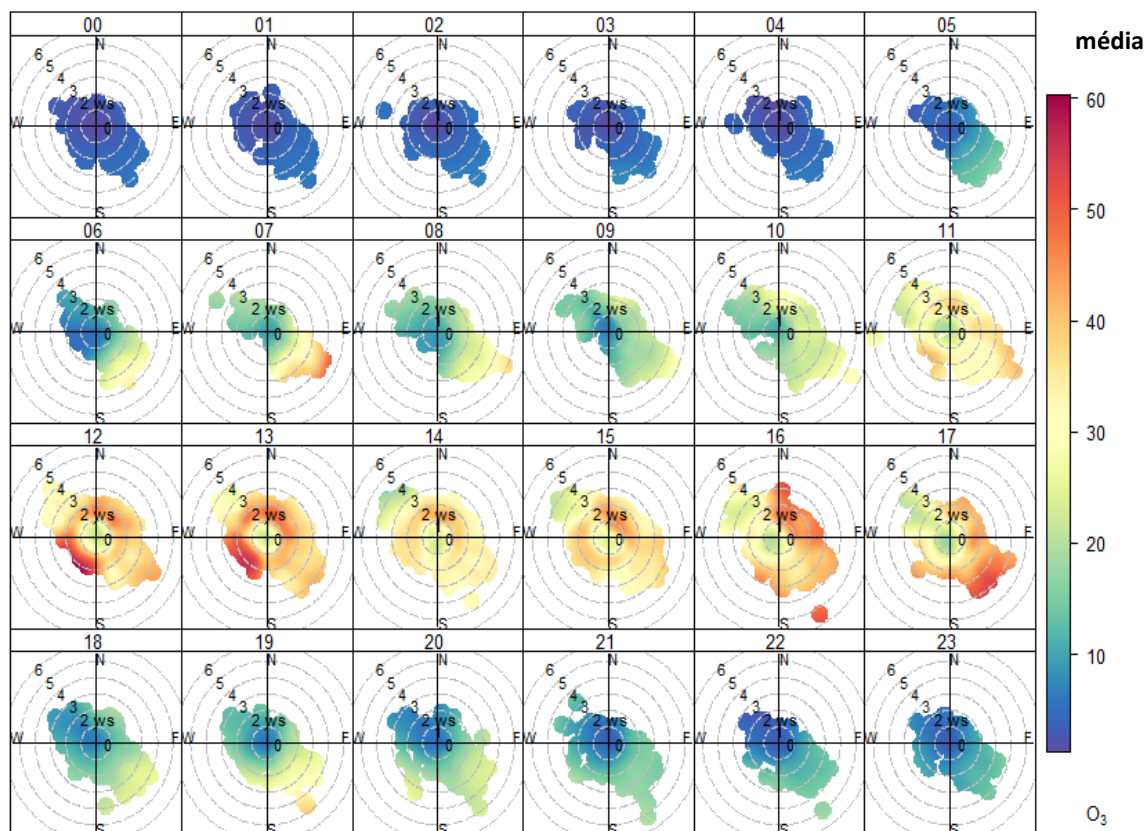


transporte do poluente escolhido ( $O_3$ ) e sua formação. Pode-se tomar como exemplo a Figura 11.ii, onde no período entre 00h e 5h nota-se um aumento na concentração de  $O_3$  proveniente do quadrante sudeste, isso representa o aumento do transporte deste poluente proveniente deste quadrante com o passar das horas, chegando até a estação de monitoramento.

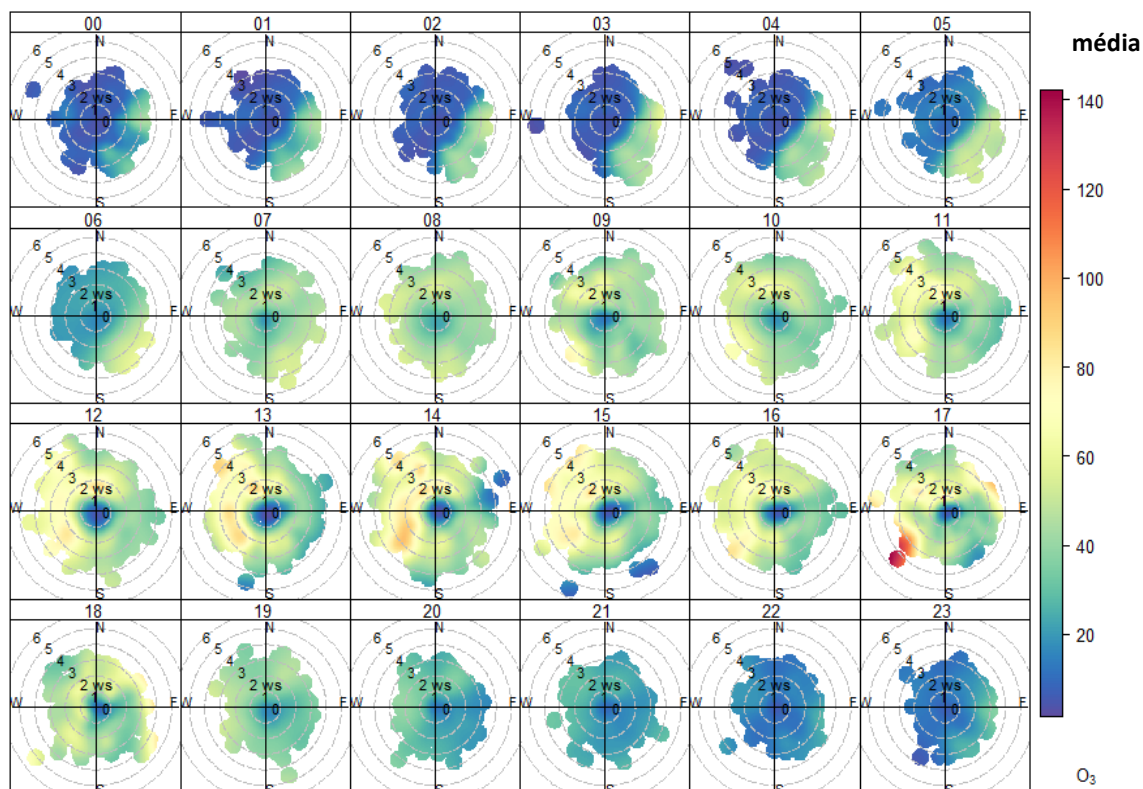
A partir da Figura 11, cabe destacar ainda a formação de ozônio nas proximidades da estação Contorno mostrou-se, em sua maioria, ser de origem local, com algumas exceções que podem ser observadas entre 18 e 23 horas, onde a presença do ozônio no local é proveniente do transporte de outras localidades. Em contrapartida, na estação Amazonas, a maior parte do ozônio também é produzido diariamente no próprio local, porém no período noturno há transporte atmosférico de ozônio de outras localidades durante todo o período sem radiação.

**Figura 11-** Formação média horária de Ozônio em Belo Horizonte

(i) Estação Contorno



## (ii) Estação Amazonas



Fonte: Do autor

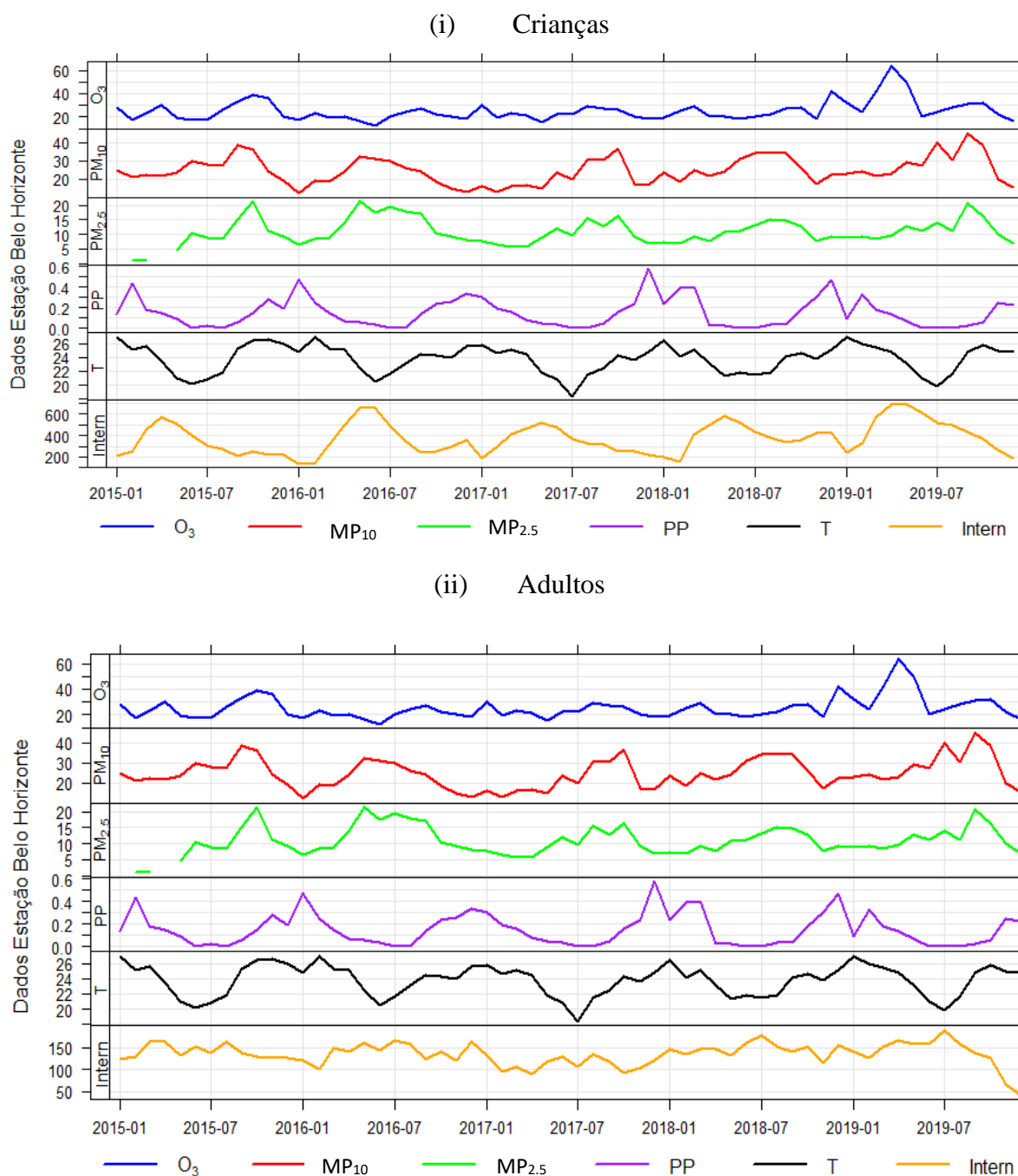
### 5.3 Associações entre Poluentes Atmosféricos e as Admissões Hospitalares

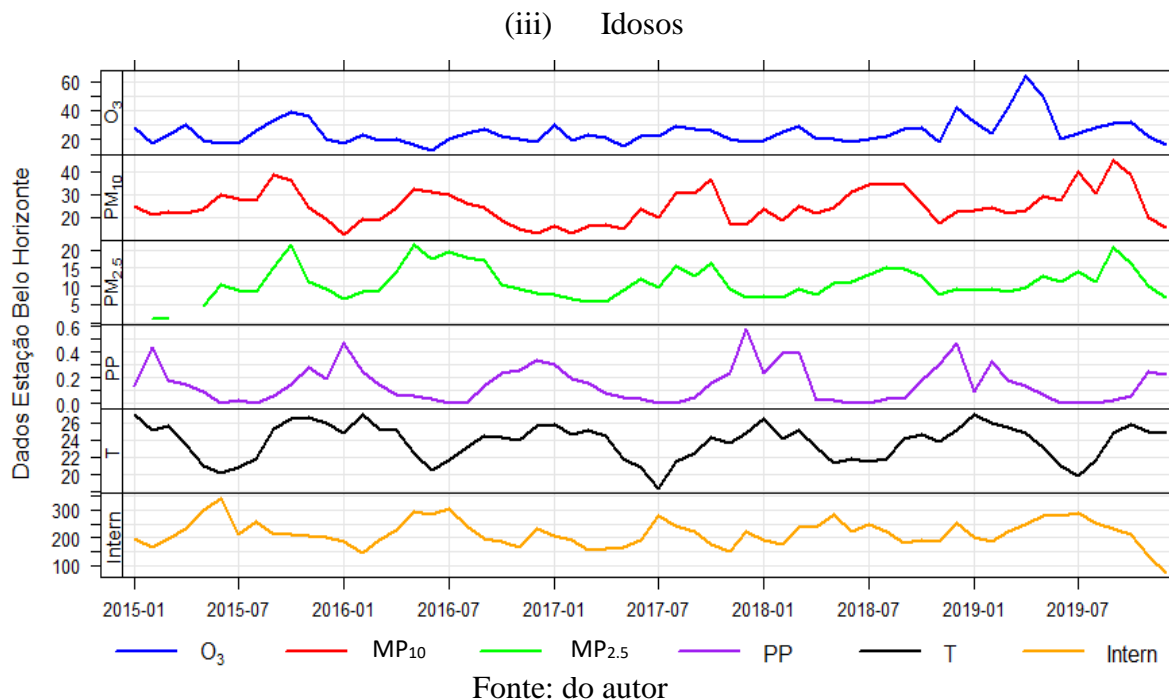
Para os hospitais analisados, dentro do período de 2015 a 2019, foram registradas 22.473 internações de crianças, compreendida pela faixa de 0 a 14 anos, 8.068 internações de adultos, compreendidos entre 15 e 59 anos e 13.034 internações de idosos, considerados a partir de 60 anos, por doenças relacionadas ao sistema respiratório.

A fim de observar o perfil temporal dos poluentes atmosféricos em conjunto com os dados de admissões hospitalares, construiu-se a Figura 12. Cabe destacar que apesar do ozônio demonstrar uma oscilação com o tempo, esta não é sazonal, o que reforça a ideia de formação a partir de poluição local (ver Figura 11). No caso do material particulado, nota-se que há uma sazonalidade presente, com valores máximos durante o inverno e mínimos durante o verão, o que é razoável, visto que na região analisada o inverno é caracterizado pela queda nas temperaturas, menor umidade relativa e baixa precipitação, o que resulta em um aumento na

concentração de particulados no ar. Todavia, durante o verão, a precipitação age removendo os particulados presentes na atmosfera e reduzindo a ressuspensão no solo (SEINFELD; PANDIS, 2016).

**Figura 12-** Variação dos parâmetros ozônio ( $O_3$ ), material particulado ( $MP_{10}$  e  $MP_{2.5}$ ), temperatura (T) e precipitação (PP) e admissões hospitalares por morbidades respiratórias com o decorrer do tempo no município de Belo Horizonte entre 2015 e 2019.





Além disso, é possível observar que o padrão notado com relação ao material particulado acompanha a variação nas taxas de internações hospitalares por doenças respiratórias para ambos os grupos. Tal ocorrência pode ser justificada pelo conjunto compreendido por mudança do tempo - com a redução da temperatura e precipitação, precedido do aumento na concentração de poluentes atmosféricos e tendo como efeito o aumento na admissão hospitalar de pessoas que apresentem um quadro de doenças respiratórias mais graves, como asma, bronquite, sinusite e rinite, cujos quadros clínicos se agravam mais rapidamente com tais mudanças.

Para os adultos, há um padrão na relação entre as variáveis ambientais e as taxas de internações, porém este se apresenta de forma bem menos expressiva, o que pode ser explicado por alguns fatores, como a faixa etária presente neste grupo ser menos susceptível às variações meteorológicas e ambientais, além de uma parcela significativa realizar trabalhos e/ou estudos nos quais se passa uma maior parte do tempo em ambientes internos onde tais variações ocorrem de forma reduzida, e até mesmo por ser uma faixa etária que não tem o hábito de frequentar ambiente hospitalar a menos que seja muito necessário ou que tenha comorbidades que tornem esta ação necessária.

Devem ser levados em consideração também fatores como o tempo de exposição, frequência e concentração à qual a pessoa foi exposta (DANA DESONIE, 2007).

Levando em consideração tais fatores pode-se compreender se as internações são referentes a uma exposição aguda ou crônica, auxiliando o entendimento do *lag* presente entre os picos de internações e os picos de emissão dos poluentes no ar.

Em alguns países do Hemisfério Norte, a diferença entre as concentrações de material particulado no verão e no inverno pode ser notada por conta da mudança no número de veículos nas ruas, além das características sazonais (AKYUZ; ÇABUK, 2009). Porém, na cidade do estudo, não há variações sazonais significativas que possam promover alteração do padrão de comportamento das pessoas e suas atividades durante o ano. No entanto, com a diminuição das temperaturas durante o inverno, também há a menor presença de pessoas em ambientes externos, principalmente crianças e idosos, o que pode indicar que outros fatores além do aumento da concentração de particulados no ar têm influenciado no aumento das taxas de internação durante esse período.

#### **5.4 Modelos Lineares Múltiplos**

A fim de validar e quantificar a relação entre os poluentes atmosféricos e as admissões hospitalares, foram construídos modelos lineares múltiplos em que o número de internações foi considerado como variável dependente dos modelos, e as variáveis ambientais (ozônio, material particulado fino e grosso, temperatura, umidade relativa e precipitação) são independentes. Os modelos foram construídos para todas as faixas etárias, e tem seus resultados apresentados na Tabela 6 e seus resíduos na Figura 13.

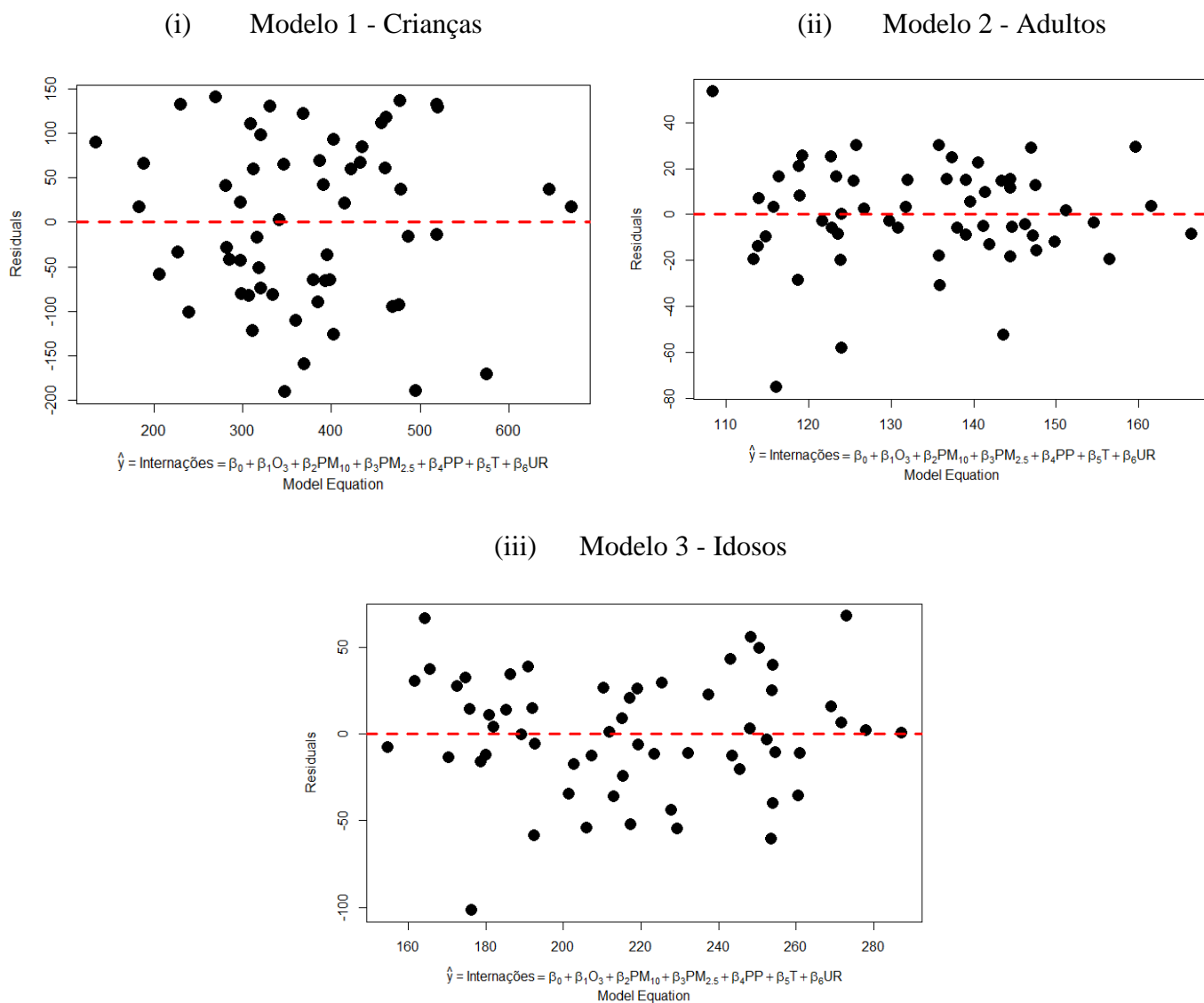
**Tabela 6-** Regressão Linear Múltipla dos dados de internação e variáveis ambientais para crianças (modelo 1), adultos (modelo 2) e idosos (modelo 3).

Variáveis		Parâmetros do modelo			
Modelo	Dependente	Independente	$\beta_0$	$\beta_i$	$R^2_{ajust}$
1		<b>O<sub>3</sub></b>		5,48****	0,53
		<b>MP<sub>10</sub></b>		2,71	
		<b>MP<sub>2.5</sub></b>		5,42	
		<b>Precipitação</b>	-524,49	-578,18****	
		<b>Temperatura</b>		-13,76	
		<b>Umidade Relativa</b>		16,7****	
2	Internações	<b>O<sub>3</sub></b>		0,68*	0,19
		<b>MP<sub>10</sub></b>		1,75**	
		<b>MP<sub>2.5</sub></b>		-0,39	
		<b>Precipitação</b>	58,22	-13,78	
		<b>Temperatura</b>		-2,13	
		<b>Umidade Relativa</b>		1,15	
3		<b>O<sub>3</sub></b>		1,41**	0,45
		<b>MP<sub>10</sub></b>		1,92*	
		<b>MP<sub>2.5</sub></b>		1,33	
		<b>Precipitação</b>	343,42	11,16	
		<b>Temperatura</b>		-13,87****	
		<b>Umidade Relativa</b>		1,65	

\*\*\*\*p value<0.001, \*\*\*p value<0.01, \*\*p value<0.05, \*p value<0.1

Fonte: do autor

**Figura 13-** Valores residuais dos modelos de regressão para os grupos de crianças, adultos e idosos



Fonte: do autor

Através da regressão linear múltipla observam-se três equações que modelam os resultados de internações, sendo para o grupo infantil:

$$\hat{Y} = -524,49 + 5,48O_3 + 2,71MP_{10} + 5,42MP_{2,5} - 578,18PP - 13,76T + 16,7UR$$

Com um  $R^2_{ajust}$  de 0,53 enquanto para grupo dos adultos:

$$\hat{Y} = 58,22 + 0,68O_3 + 1,75MP_{10} - 0,39MP_{2,5} - 13,78PP - 2,13T + 1,12UR$$

Com um  $R^2_{\text{ajust}}$  de 0,19 e para o grupo dos idosos:

$$\hat{Y} = 343,42 + 1,41O_3 + 1,92MP_{10} + 1,33MP_{2,5} + 11,16PP - 13,87T + 1,65UR$$

Com um  $R^2_{\text{ajust}}$  de 0,45.

Para os grupos de crianças e idosos o resultado encontrado foi satisfatório, indicando que o modelo é capaz de explicar parte (53% e 45%, respectivamente) dos resultados, apesar dos resíduos apresentados na Figura 14 indicarem uma superestimativa dos resultados a partir do modelo. Além disso, as variáveis que melhor explicaram o ajuste linear múltiplo foram o  $O_3$  e  $MP_{10}$ , que indicam um aumento na taxa de internações com o aumento de suas concentrações. As variáveis meteorológicas precipitação e temperatura, tiveram comportamento negativo, o que significa que se os valores das variáveis aumentam, as taxas de internação reduzem, o que é confirmado na Figura 12.i.

Avaliando o grupo de adultos, o resultado encontrado não foi satisfatório, mas pode ser explicado pelo fato de este não ser um grupo considerado de risco onde a oscilação na concentração dos poluentes afeta de maneira significativa as internações de maneira linear. Para melhor ajustar as variáveis de interesse seria necessária a criação de modelos de regressão múltiplos não lineares, além da adição de outras variáveis como comorbidades, tempo de exposição aos poluentes, situação socioeconômica. Apesar disso, observa-se uma relação positiva entre a concentração de  $O_3$  e  $MP_{10}$  e as taxas de internações, além da relação negativa com a temperatura e precipitação.

## 6. CONCLUSÃO

A poluição atmosférica é um problema que afeta a todos, em todo o mundo. No entanto, existem alguns fatores que tornam alguns grupos mais afetados do que outros. Para entender como esses grupos são afetados seriam necessárias informações como comorbidades, faixa etária, grupo de risco/não risco, escolaridade, renda, domicílio e histórico clínico, importantes de levar em consideração para que não haja ocorrência de falácia ecológica, que se trata de uma falsa percepção de associação entre as variáveis observadas, mas que foram distorcidas por variáveis que não estavam incluídas no estudo.

Além disso, os indivíduos da população estão expostos em graus diferentes a cada variável ambiental. Os resultados obtidos representam o comportamento de um grupo, não



podendo se esperar que o comportamento para cada indivíduo seja o mesmo. Por conta disso, estudos ecológicos são considerados estudos preliminares para dar um direcionamento para futuros estudos que melhorem a compreensão entre as relações dos poluentes atmosféricos e saúde pública.

Para obter uma maior acurácia nos resultados obtidos e nas justificativas, também é de suma importância a realização de estudos com uma série temporal mais extensa, e em uma maior parte do território, o que no momento não é possível, visto que o município de Belo Horizonte só conta com duas estações de monitoramento da qualidade do ar e os seus dados públicos só estão disponíveis para um período de dez anos, sendo que alguns destes apresentam inúmeros buracos na sua série podendo se tornar mais um fator enviesando os resultados. Também há uma questão da demora da disponibilização desses dados, enquanto para a região metropolitana de São Paulo os dados podem ser obtidos online em tempo real, para Minas Gerais esses dados demoram anos para estarem disponíveis.

Os estudos relacionados à qualidade do ar são uma importante ferramenta para avaliar a evolução na influência da poluição do ar na qualidade de vida da população, além de possibilitar o desenvolvimento de modelos de previsão de casos no município, o que permitiria uma melhoria na qualidade do atendimento hospitalar, porém por conta dessa ausência de informações para a maior parte do território brasileiro é que ainda são escassos os estudos associando poluição atmosférica e saúde pública no Brasil.

De forma a mudar este cenário, é importante o desenvolvimento de uma gama maior de estudos epidemiológicos no Brasil, principalmente estudos locais, visto que há diferentes concentrações de poluentes em cada localidade e isto afeta de forma distinta os variados grupos populacionais.

## 7. REFERÊNCIAS

ABDO ARBEX, M. *et al.* A poluição do ar e o sistema respiratório\* Air pollution and the respiratory system Artigo de Revisão. *J Bras Pneumol*, v. 38, n. 5, p. 643–655, 2012.

ABELSOHN, A. *et al.* Identifying and managing adverse environmental health effects: 6. Carbon monoxide poisoning. *Cmaj*, v. 166, n. 13, p. 1685–1690, 2002.

AKYUZ, M.; ÇABUK, H. Meteorological variations of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak, Turkey. *Journal of Hazardous Materials*, v. 170, n. 1, p. 13–21, 2009.

ANDREÃO, W. L. *et al.* Quantifying the impact of particle matter on mortality and hospitalizations in four Brazilian metropolitan areas. *Journal of Environmental Management*, v. 270, n. January, 2020.

ANDREÃO, W. L.; DE ALMEIDA ALBUQUERQUE, T. T. Fine particles as a public health indicator in Brazil: from monitoring to modeling. *Air Quality, Atmosphere and Health*, v. 13, n. 12, p. 1453–1463, 2020.

ARTAXO, P. A problemática da poluição do ar em regiões metropolitanas. *Revista Ambiente Urbano e Qualidade de Vida*, v. 3, p. 28–36, 1991.

BAKONYI, S. M. C. *et al.* Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR. *Revista de Saúde Pública*, v. 38, n. 5, p. 695–700, 2004.

BATES, D. V. *Ozone-Myth and reality*. *Environmental Research*. Academic Press. , 1 dez. 1989

BRAGA, A. *et al.* Poluição atmosférica e saúde humana. p. 58–71, 2001.

BRAGA, A. L. F. *et al.* Health Effects of Air Pollution Exposure on Children Ä o Paulo, Brazil and Adolescents in Sa. *Public Health*, v. 113, n. September 2000, p. 106–113, 2001.

BRAGA, B. *et al.* *Introdução à Engenharia Ambiental: O Desafio do desenvolvimento Sustentável.*, 2005.

BRASIL. *Resolução CONAMA 491, de 19 de novembro de 2018*. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União*, 2018.

BRITO, H. Impactos da inovação na empresa siderúrgica Arcelormittal Monlevad: Estudo de Caso. *CONCISA - Revista Multidisciplinar da Área de Ciências Sociais Aplicadas*, p. 264–287, 2015.

BRUNEKREEF, B.; HOLGATE, S. T. *Air pollution and health*. *Lancet*. Elsevier Limited. , 19 out. 2002

CANÇADO, J. E. D. *et al.* Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, v. 32, n. suppl 2, p. S5–S11, maio 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-37132006000800003&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-37132006000800003&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 16 jan. 2021.

CARSLAW, D. C.; ROPKINS, K. *openair --- An R package for air quality data analysis*. Environmental Modelling & Software, 2012

CETESB. *Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2013*. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2014. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>>.

CHEN, R. *et al.* Ambient carbon monoxide and daily mortality in three Chinese cities: The China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES). *Science of the Total Environment*, v. 409, n. 23, p. 4923–4928, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.029>>.

CUNHA, R. M. P. *Estudo do Transporte de Poluentes na Região do Pólo Petroquímico, Localizado Em Triúnfo- Rs*. 2002.

DANA DESONIE. *Atmosphere: Air Pollution and Its Effects (Our Fragile Planet)*. 1. ed. Chelsea House Publications, 2007.

DANNI-OLIVEIRA, I. M.; BACONYI, S. M. *Condicionantes atmosféricos e a variabilidade das concentrações de MP total em Curitiba/PR*. . Canoas:ABES, 2003, CD-ROM: : CONGRESSO INTERAMERICANO DE QUALIDADE DO AR. , 2003

DE MIRANDA, R. M. *et al.* Urban air pollution: A representative survey of PM 2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere and Health*, v. 5, n. 1, p. 63–77, 2012.

DE MORAES, S. L. *et al.* Meteorological variables and air pollution and their association with hospitalizations due to respiratory diseases in children: A case study in São Paulo, Brazil. *Cadernos de Saude Publica*, v. 35, n. 7, 2019.

DE OLIVEIRA FERNANDES, M. A. *et al.* Avoiding hospital admissions for respiratory system diseases by complying to the final Brazilian air quality standard: an estimate for Brazilian southeast capitals. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 29, p. 35889–35907, 2020.

EPA. *Criteria Air Pollutants*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>>. Acesso em: 3 jan. 2021.

EUM, K. DO *et al.* Long-term NO<sub>2</sub> exposures and cause-specific mortality in American older adults. *Environmental International*, v. 124, n. 2, p. 10–15, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.060>>.

FAJERSZTAJN, L. *et al.* Air pollution: A potentially modifiable risk factor for lung cancer. *Nature Reviews Cancer*, v. 13, n. 9, p. 674–678, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nrc3572>>.

FAJERSZTAJN, L. *et al.* Short-term effects of fine particulate matter pollution on daily health events in Latin America: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Public Health*, v. 62, n. 7, p. 729–738, 2017.

FEAM. *Plano de controle de poluição veicular de Minas Gerais 2014-2017*. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2014

FINLAYSON-PITTS, B.; PITTS JR., J. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*.: Academic Press, 1999.

FISCHER, P. H. *et al.* Trends in relative risk estimates for the association between air pollution and mortality in The Netherlands, 1992-2006. *Environmental Research*, v. 111, n. 1, p. 94–100, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2010.09.010>>.

GALVÃO, E. S. *Influência dos compostos orgânicos voláteis no potencial de formação do ozônio troposférico na Grande Vitória-ES*. 2014. Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.

GOUVEIA, N.; FLETCHER, T. Respiratory diseases in children and outdoor air pollution in Sao Paulo, Brazil: A time series analysis. *Occupational and Environmental Medicine*, v. 57, n. 7, p. 477–483, 2000.

GUARIEIRO, L. L. .; VASCONCELLOS, P. .; SOLCI, M. . Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão. *Revista*

*Virtual de Química*, v. 3, n. 5, p. 434–445, 2011.

GUERRA, T. *Estudo Sobre a Turbulência Na Camada Limite Planetária*. 2008. 76 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2008.

HAMRA, G. B. *et al.* Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*, v. 122, n. 9, p. 906–911, 2014.

HEI. UNDERSTANDING THE HEALTH EFFECTS OF COMPONENTS OF THE PARTICULATE MATTER MIX: PROGRESS AND NEXT STEPS. *Health Effects Institute Perspectives*, 2002.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *IBGE cidades*. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 3 jan. 2021. , 2020

IEMA, Instituto de Energia e Meio Ambiente. *Io Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil*. . São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente. , 2014

JÜNGER, J. *et al.* Depression increasingly predicts mortality in the course of congestive heart failure. *European Journal of Heart Failure*, v. 7, n. 2, 2005.

KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J. *Atmospheric Boundary Layer Flows Their Structure and Measurement*. New York Oxford: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1994.

KEMP, D. D. *Global environmental issues: A climatological approach*. 2. ed. U. S. Routledge, 2002.

KOBAYASHI, Y. *et al.* Mortality risks due to long-term ambient sulphur dioxide exposure: large variability of relative risk in the literature. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 29, p. 35908–35917, 2020.

KÜNZLI, N.; PEREZ, L.; RAPP, R. Air Quality and Health. *EUROPEAN RESPIRATORY SOCIETY*, 2010.

LADEN, F. *et al.* Reduction in fine particulate air pollution and mortality: Extended follow-up of the Harvard Six Cities Study, 2006. v. 173.

LIMA, M.; ELEBRAS-VEIGA, L. Gestão sustentável da Indústria Siderúrgica a partir das premissas da ecologia industrial. *5th International Workshop - Advances in Cleaner Production. Academic Work. Brasil - São Paulo*, 2015.

LOECK, J. F. *Efeitos estocásticos em modelos determinísticos para dispersão de poluentes na camada limite atmosférica*. 2014. 97 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/131025>>.

LOOMIS, D. *et al.* The carcinogenicity of outdoor air pollution. *Lancet Oncol*, v. 14, 2013.

MARTINS, M. C. H. *et al.* Influence of socioeconomic conditions on air pollution adverse health effects in elderly people: An analysis of six regions in São Paulo, Brazil. *Journal of Epidemiology and Community Health*, v. 58, n. 1, p. 41–46, 2004.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. *TABNET*. Disponível em: <<http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php?area=02>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

MORAES, O. L. L. *Meteorologia e poluição atmosférica: teoria, experimentos e simulação*. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2010.

NASCIMENTO, A. P. *et al.* Association between the concentration of fine particles in the atmosphere and acute respiratory diseases in children. *Revista de Saude Publica*, v. 51, n. 1, p. 1–10, 2017.

NASCIMENTO, L. F. C. *et al.* Efeitos da poluição atmosférica na saúde infantil em São José dos Campos, SP TT - Effects of air pollution on children health in a city in Southeastern Brazil. *Revista de Saúde Pública*, v. 40, n. 1, p. 77–82, 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-89102006000100013&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org/pdf/rsp/v40n1/en\\_27119.pdf%0Ahttp://www.scielo.org/pdf/rsp/v40n1/27119.pdf](http://www.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-89102006000100013&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org/pdf/rsp/v40n1/en_27119.pdf%0Ahttp://www.scielo.org/pdf/rsp/v40n1/27119.pdf)>.

NETTO, F. D. *et al.* Formação de ozônio troposférico : uma revisão da literatura. 2017.

NOGUEIRA, T. *et al.* Formaldehyde and acetaldehyde measurements in urban atmosphere impacted by the use of ethanol biofuel: Metropolitan Area of Sao Paulo (MASP), 2012– 2013. *Fuel*, v. 134, p. 505–513, 2014.

NUVOLONE, D.; PETRI, D.; VOLLER, F. The effects of ozone on human health. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, n. 9, p. 8074–8088, 2018.

POPE, C. A. Review: Epidemiological basis for particulate air pollution health standards. *Aerosol Science and Technology*, v. 32, n. 1, p. 4–14, 2000.

R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019

RAVEN, P. H.; BERG, L. R.; JOHNSON, G. B. *Environment*. Fort Worth, Saunders College Publishing, 1995.

REMUS, R. *et al.* *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production*. Espanha: European Comission, 2013.

RIBEIRO, A. G. *et al.* Incidence and mortality risk for respiratory tract cancer in the city of São Paulo, Brazil: Bayesian analysis of the association with traffic density. *Cancer Epidemiology*, v. 56, n. July, p. 53–59, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.canep.2018.07.005>>.

ROCHA, N. L. T.; GUIMARÃES, C. DE S. Estudo da Qualidade do Ar e a Atividade Siderúrgica na Cidade de Volta Redonda. *Cadernos UniFOA*, v. 12, n. 33, p. 25–36, 2017. Disponível em: <<http://revistas.unifoa.edu.br/index.php/cadernos/article/view/497/1161>>.

ROGUIN, A. *et al.* Long-term prognosis of acute pulmonary oedema — an ominous outcome. *Eur J Heart Fail*, p. 137–144, 2000.

SALDIVA, P. H.N. *et al.* Association between Air Pollution and Mortality Due to Respiratory Diseases in Children in São Paulo, Brazil: A Preliminary Report. *Environmental Research*, 1994

SALDIVA, PAULO H.N. *et al.* Air pollution and mortality in elderly people: A time-series study in sao paulo, Brazil. *Archives of Environmental Health*, v. 50, n. 2, p. 159–163, 1995.

SCHWARTZ, J. Air Pollution and Children's Health. *Pediatrics*, v. 113, n. 4, p. 1037–1043, 2004.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3. ed. John Wiley & Sons, Inc, 2016.

SHARMA, A. Carbon monoxide poisoning in our homes - report of two survivors from North India. *The Medico-legal journal*, v. 84, n. 2, p. 87–89, 2016.

SOLBERG, S. *et al.* European abatement of surface ozone in a global perspective. *Ambio*, v. 34, n. 1, p. 47–53, 2005.

SOUZA, R. *Análise dos Impactos de Emissões Atmosféricas Locais da Indústria Siderúrgica: Um Estudo de Caso no Rio de Janeiro*. 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

STULL, R. B. An introduction to boundary layer meteorology. *An introduction to boundary layer meteorology*, 1988.

TACIANA, T. T. *et al.* Analysis of PM<sub>2.5</sub> concentrations under pollutant emission control strategies in the metropolitan area of São Paulo, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 32, p. 33216–33227, 2019.

TADANO, Y. S. *Simulação da Dispersão dos Poluentes Atmosféricos para Aplicação em Análise de Impacto*. 2012. 197 f. Universidade Estadual de Campinas, 2012.

TOWNSEND, C. L.; MAYNARD, R. L. Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide. *Occupational and Environmental Medicine*, v. 59, n. 10, p. 708–711, 2002.

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e Climatologia*. 2nd. ed. Recife, 2006.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. *Modern Applied Statistics with S*,. 4. ed. Springer, New York, 2002.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. *Atmospheric Science An introductory survey*. 2 ed., 2006.

WHO. Health Risk Assessment of air pollution. *World Health Organization Regional Office for Europe*, p. 1–40, 2016. Disponível em: <<https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/activities/airq-software-tool-for-health-risk-assessment-of-air-pollution%0Ahttp://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/activities/airq-software-t>>.

WHO. The world health report 1999 - making a difference. *World Health Organization*, 1999. Disponível em: <[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42167/WHR\\_1999.pdf](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42167/WHR_1999.pdf)>.

WHO. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005. *World Health Organization*, p. 1–21, 2005.

WHO. WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. *World Health Organization*, 2006.