

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CEFET – MG**

Isabella Soares Fernandes Goecking

**ASPECTOS RELEVANTES DA PRESENÇA DE CONSTITUINTES
METÁLICOS EM MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO: CENÁRIO
ATUAL NO BRASIL**

**Belo Horizonte – MG
2021**

Isabella Soares Fernandes Goecking

**ASPECTOS RELEVANTES DA PRESENÇA DE CONSTITUINTES
METÁLICOS EM MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO: CENÁRIO
ATUAL NO BRASIL**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel
em Química Tecnológica.**

**Orientador: Prof. Dr. Patrícia Sueli de
Rezende**

**Coorientador: Bruno Augusto de
Oliveira Silva**

CEFET – MG

Belo Horizonte – MG

2021

Isabella Soares Fernandes Goecking

**ASPECTOS RELEVANTES DA PRESENÇA DE CONSTITUINTES
METÁLICOS EM MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO: CENÁRIO
ATUAL NO BRASIL**

**Trabalho de Conclusão de Curso do bacharelado em Química Tecnológica
CEFET MG**

Belo Horizonte, 25 de março de 2021.

**Profa. Dra. Patrícia Sueli de Rezende
(Orientador – CEFET-MG)**

**Bruno Augusto de Oliveira Silva
(Coorientador – ECOAMB Pesquisas Ambientais)**

**Profa. MSc. Janice Cardoso Rocha Pereira
(Avaliador – CEFET-MG)**

**Prof. Dr. Leonel da Silva Teixeira
(Avaliador – CEFET-MG)**

Dedico esse trabalho aos meus pais,
Anderson e Linda e
ao meu marido, Pedro.
Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Ao eterno e soberano Deus sou grata pelo dom da vida e do conhecimento, por criar as ciências exatas e possibilitar ao ser humano compreender um pouco do universo. Todo mérito seja atribuído a Ele.

Aos meus pais, Anderson e Linda, serei eternamente agradecida por todo sacrifício, dedicação e disposição em priorizarem minha educação. Obrigada por serem meus exemplos e por me proporcionarem voar cada vez mais alto.

Ao meu marido, Pedro, agradeço todo companheirismo cercado de amor e por sempre acreditar em mim!

Aos meus familiares e amigos agradeço toda paciência e apoio durante essa trajetória. O carinho e a amizade de vocês alegraram meus dias em meio às diversas abdições.

Agradeço ao CEFET-MG e docentes, que proporcionaram com excelência minha formação em Bacharel em Química Tecnológica, em especial ao coordenador do curso, Márcio Basílio, por todo apoio e dedicação ao seu cargo, fazendo diferença na vida dos alunos.

À minha orientadora Patrícia Sueli de Rezende, agradeço por toda dedicação aplicada a esse trabalho, por todas as sugestões, pela parceria e por sempre ir além, não se limitando ao ensino na área de química. Sou muito privilegiada por ser sua aluna e amiga!

Ao meu co-orientador, Bruno Augusto de Oliveira Silva, agradeço a oportunidade profissional e pela paciência em tornar meu aprendizado relevante para a nossa sociedade.

Aos meus colegas de classe sou grata pelo apoio e parceria durante toda a graduação. Em especial agradeço a Viviane e o Jefferson, por toda amizade e horas de estudos compartilhados. Vocês são demais!

Por fim, agradeço a todos os cientistas, principalmente os brasileiros, que dedicaram ou ainda dedicam horas de pesquisas para o avanço do conhecimento da química.

“A ciência traz de suas pesquisas
apenas novas provas da
sabedoria e poder de Deus.”
Ellen G. White

“Digno é o Autor da alegria,
à Ele a *minha* eterna gratidão.”
Vocal Livre

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAFe- Comunidade Acadêmica Federada
CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM- Conselho Estadual de Política Ambiental
FAAS- Espectroscopia de Absorção Atômica com Chama
FEAM- Fundação Estadual do Meio Ambiente
FRX- Espectrometria de Fluorescência de Raios-X
GFAAS- Espectroscopia de Absorção Atômica Forno de Grafite
GO- Goiás
HC- Hidrocarboneto
ICP-MS- Espectroscopia de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente
ICP-OES- Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente
IQAr- índice da Qualidade do Ar
MAS- Sociedade Americana de Meteorologia
MG- Minas Gerais
MP- Material Particulado
MP₁₀- Partículas menores que 10 µm
MP_{2,5}- Partículas menores que 2,5 µm
NBR- Norma Brasileira
NIST- *Nacional Institute of Standards and Technology*
OMS- Organização Mundial da Saúde
PF- Padrões de Qualidade do ar final
PI- Padrões de Qualidade do ar intermediários
PR- Paraná
PRONAR- Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
PTS- Partículas Totais em Suspensão
RJ- Rio de Janeiro
SISNAMA- Sistema Nacional do Meio Ambiente
SP- São Paulo

TA-LUFT- *Technical Instructions on Air Quality Control*

TEOM- *Tapered Element Oscillation Microbalance*

US-EPA- *United States Environmental Protection Agency*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Perfil vertical da atmosfera.	7
Figura 2- O processo de poluição ambiental.....	9
Figura 3- Relação entre a qualidade do ar e padrão de emissão.	10
Figura 4- Pluma de dispersão de PTS durante o inverno de 2016 na região de São José da Lapa.	17
Figura 5- Índices de qualidade do Ar (IQAr).....	20
Figura 6- Exemplo de um amostrador de grande volume PTS.....	23
Figura 7- Exemplo de um amostrador de grande volume MP ₁₀	23
Figura 8- Comparação do diâmetro do fio de cabelo humano e partículas de MP.	26
Figura 9- Relação entre o tempo de residência e o diâmetro aerodinâmico de MP.....	28
Figura 10- Distribuição regional de publicações sobre metais em MP no Brasil.	35
Figura 11- Forno micro-ondas para digestão de amostras.	42
Figura 12- Bloco digestor.	42
Figura 13- Filtro de Mangas	46
Figura 14- Precipitador Eletrostático.	47
Figura 15- Câmara de Poeira.....	48
Figura 16- Ciclone.	49
Figura 17- Lavador de Gases.....	50

LISTA DE TABELA

Tabela 1-Concentrações médias de metais associados ao material particulado em algumas cidades brasileiras.....	39
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Número de publicações de 01/01/2001 a 04/02/2021 relacionados aos termos metais e material particulado atmosférico encontrados no Portal de Periódicos Capes.	4
Gráfico 2- Contribuição do Brasil e dos EUA nas publicações de artigos que abordam a presença de metais em material particulado quando comparado. com as publicações no mundo até 04/02/2021.....	5
Gráfico 3- Redistribuição dos artigos em escala nacional de acordo com o ano de publicação.	31
Gráfico 4- Redistribuição dos artigos em escala nacional e global de acordo com o ano de publicação.	32
Gráfico 5- Os 10 principais metais encontrados e analisados no MP brasileiro.	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Principais legislações brasileiras que determinam limites de emissão de poluentes.....	11
Quadro 2- Padrões de emissão de metais da TA-Luft.....	13
Quadro 3- Padrões de Qualidade do Ar da CONAMA 481/ 2018.....	19
Quadro 4- Qualidade do ar e feitos à saúde.....	20
Quadro 5- Efeitos à saúde por exposição a alguns metais.....	29
Quadro 5- Efeitos à saúde por exposição a alguns metais.....	30

RESUMO

GOECKING, I.S.F.; REZENDE, P.S.; SILVA, B.A.D.O. ASPECTOS RELEVANTES DA PRESENÇA DE CONSTITUINTES METÁLICOS EM MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO: CENÁRIO ATUAL NO BRASIL

A poluição atmosférica é um importante fator de risco para mortalidade em todo o mundo, seu impacto sobre a sociedade e meio ambiente devem ser conhecidos e geridos. O material particulado (MP) é um dos principais poluentes do ar. Partículas diminutas podem ser aspiradas até aos alvéolos humanos, causando doenças respiratórias e lesões ao organismo. A presença de metais na concentração traço no material particulado aumenta o perigo de sua aspiração, já que vários desses elementos são tóxicos e são bioacumulativos. No entanto, quando amostras de MP são analisadas, sua composição não é avaliada e não há legislações brasileiras que definam padrões de qualidade e padrões de emissão para concentração de metais em material particulado para a maioria das atividades industriais. O objetivo deste estudo é retratar a necessidade de controle de emissão do material particulado de forma segmentada, isto é, pontual, específica ou separada de acordo com a composição, no Brasil, devido a presença de metais tóxicos em sua composição. Para conhecer o nível de interesse acadêmico pelo assunto, realizou-se um levantamento de todos os artigos publicados na base *Web of Science* sobre a presença de metais no material particulado atmosférico no Brasil. Ao fim da pesquisa encontrou-se 43 (quarenta e três) artigos, observou-se um crescimento do interesse sobre o assunto a partir do ano de 2014, os dez metais mais frequentemente determinados foram o Cu, Zn, Pb, Fe, Mn, Ni, Al, K, Cd e Cr. A Região Sudeste apresentou a maior representatividade de artigos publicados e as Regiões Norte e Centro-Oeste a menor representatividade. Os preparos de amostras mais utilizados foram a digestão ácida assistida por micro-ondas ou por bloco digestor. As técnicas mais aplicadas para a análise foram a Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS), a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) e a Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX). Além disso, foram abordadas também as principais formas de controle de emissão de material particulado em atividades industriais e algumas formas de controle de emissões de material particulado com equipamentos de contenção como os filtros, as câmaras de poeira, os ciclones, os precipitadores eletrostáticos e os lavadores de gases.

Palavras-chave: Material particulado, Metais, Qualidade do Ar, Brasil.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. QUALIDADE DO AR	6
3.1.1 <i>Poluentes atmosféricos</i>	8
3.1.2 <i>Padrões de Emissão</i>	10
3.1.3 <i>Dispersão do ar</i>	13
3.1.4 <i>Padrões de Qualidade do ar</i>	18
3.1.5 <i>Monitoramento de Material Particulado Atmosférico</i>	21
3.2 MATERIAL PARTICULADO	25
3.2.1 <i>Aspectos Gerais</i>	25
3.2.2 <i>Presença de metais em material particulado atmosférico e seus efeitos na saúde</i>	29
3.2.3 <i>Metais em Material Particulado Atmosférico no Brasil</i>	31
3.2.4 <i>Preparo de amostra de material particulado para determinação de metais</i>	40
3.2.5 <i>Técnicas analíticas empregadas na determinação de metais em material particulado</i>	43
3.2.6 <i>Formas de controle de emissão</i>	44
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
5. PERSPECTIVAS FUTURAS	53
6. REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição atmosférica é um fator ambiental crítico e responsável pela morte prematura de cerca de 7 milhões de pessoas no mundo no ano de 2019. No relatório de 2020, emitido pela *State of Global Air*, a poluição ambiental é o 4º maior fator de risco na classificação global de causas de mortes em 2019, perdendo apenas para a alta pressão arterial, tabaco e diabetes (STATE OF GLOBAL AIR, 2020). Portanto, a problemática das emissões atmosféricas e seus efeitos na saúde humana são questões que devem ser estudadas e geridas com o objetivo de mitigar a poluição ambiental.

As concentrações dos gases poluentes na atmosfera e o tempo de exposição desses gases em concentrações expressivas, é o binômio responsável pelos efeitos adversos na saúde do homem, na conservação do ecossistema e na degradação de materiais (CETESB, 2021). A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) afirma que nos invernos é comum o aumento das concentrações dos poluentes atmosféricos, e devido à baixa umidade do ar e condições de maior estabilidade atmosférica, há um aumento de crises respiratórias, irritação nos olhos e ressecamento da pele (CETESB, 2021).

Alguns estudos têm observado fortes evidências para uma relação direta entre a poluição atmosférica com o aumento do número de mortes causadas pelo COVID-19 em cidades ao redor do mundo, pois as síndromes respiratórias estão mais propensas a ocorrerem em locais onde apresentam condições meteorológicas desfavoráveis, causadas pela poluição atmosférica, à dispersão do ar. Vale ressaltar que a ocorrência desses estudos científicos em vários países distintos reafirma a relação entre a poluição atmosférica com a taxa de mortalidade do vírus. De acordo com pneumologistas, o vírus SARS-CoV-2, partículas respiráveis (menores que 2,5 μm - $\text{MP}_{2,5}$) e o gás NO_2 atacam os mesmos alvos em nossos organismos. Eles podem causar inflamação do sistema vascular dos pulmões, pneumonia secundária, hipertensão e também infarto do miocárdio e insuficiência cardíaca. (FRONTERA *et al.*, 2020; GONZAGA; FREITAS, 2020; LIU; WANG; ZHENG, 2020; PATRA *et al.*, 2020; RÉDON; SAPIÑA; AROCA, 2020; TRAVAGLIO *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2020).

O material particulado (MP) atmosférico, parâmetro em destaque neste trabalho, é o conjunto de partículas sólidas e líquidas que são encontrados no ar, possui um processo de formação complexo e devido ao baixo diâmetro aerodinâmico, pode ser detectado nos tratos respiratórios, pulmões e até alvéolos, ocasionando diversas doenças respiratórias, cardiovasculares, cânceres, infecções ou derrames cerebrais em humanos (STATE OF GLOBAL AIR, 2020).

Dentre os indivíduos mais vulneráveis às consequências da exposição a elevadas ou constantes concentrações de poluentes atmosféricos estão as crianças, inclusive os bebês recém-nascidos, as mulheres, principalmente as gestantes, os idosos, os trabalhadores que são frequentemente expostos à recepção desses gases e as pessoas que já possuem alguma doença respiratória (STATE OF GLOBAL AIR, 2020).

Os efeitos da emissão de MP sobre o meio ambiente são as contaminações do ar, da água, do solo e das vegetações. O contato das partículas acopladas a gases ácidos resultantes da poluição do ar, com a clorofila, prejudica a manutenção da troca gasosa necessária para a manutenção das folhas vivas (GUIMARÃES, 2016).

A presença de metais em concentração traço agregados às substâncias contidas no MP representa um agravamento no impacto à saúde humana, já que alguns desses elementos apresentam níveis de toxicidade elevados. No entanto, geralmente, quando os MP são amostrados, sua composição não é avaliada. A comparação é feita apenas em termos de quantidade em massa de MP (total ou por granulometria) por unidade de volume de ar, sendo a unidade $\mu\text{g m}^{-3}$ a mais utilizada. (SOUZA, 2015; GUIMARÃES, 2016).

As fontes do ar contaminado por metais são majoritariamente decorrentes de atividades antrópicas, como a mineração, a fundição, a queima de combustíveis, as metalúrgicas e as aplicações industriais. Os principais metais presentes em poluentes atmosféricos são cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), zinco (Zn), cobalto (Co), níquel (Ni), vanádio (V), alumínio (Al), prata (Ag), cádmio (Cd), cromo (Cr), mercúrio (Hg) e o chumbo (Pb) (GUIMARÃES, 2016).

A fim de determinar traços metálicos em amostras são utilizadas técnicas instrumentais para quantificação dos mesmos. As técnicas analíticas mais citadas para a determinação de metais são a Espectroscopia de Absorção Atômica com Chama (FAAS), a Espectroscopia de Absorção Atômica Forno de Grafite (GF AAS), a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) a Espectroscopia de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS) e a Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX). A escolha da técnica dependerá da faixa de concentração dos metais e do objetivo da análise. O preparo da amostra pode ser em meio ácido, aquoso ou orgânico, sendo a forma de extração de acordo com a solubilidade dos metais a serem analisados (SILVA; CARNEIRO; FERNANDES, 2012; SANTOS, 2017).

No Brasil, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 491 de 2018 que dispõe sobre os padrões de qualidade do ar, determina os limites para material particulado inalável, partículas totais em suspensão, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, fumaça, ozônio, monóxido de carbono e chumbo (MMA, 2018). Porém não há uma legislação brasileira que apresente especificação para especificação para valores máximos aceitáveis de constituintes metálicos associados a material particulado, tão pouco sobre qual metodologia de quantificação de tais elementos na atmosfera para fins de atender à legislação e serem constantemente monitorados pelas autoridades ambientais, justificando a atenção especial à essa questão neste trabalho.

De acordo com Zhang *et al* (2014) a presença de metais associada ao material particulado atmosférico não é tão discutida quanto a contaminação elementar em solos e na água. Diante do exposto, o objetivo deste estudo é retratar a necessidade do controle de emissão de material particulado atmosférico de forma segmentada no Brasil, isto é, pontual, específica ou separada de acordo com a composição, devido a presença de metais tóxicos em sua composição. Para isso, foi feito um levantamento bibliográfico de publicações acadêmicas sobre a presença de metais em material particulado em diferentes localidades brasileiras e discutiu-se sobre os efeitos desses poluentes na saúde do ser humano e no meio ambiente.

2. METODOLOGIA

A busca por referências bibliográficas foi inicialmente direcionada para verificar a presença de metais em material particulado atmosférico, com o objetivo de conhecer a relevância desse assunto no meio acadêmico e conseqüentemente sua importância para a melhoria na qualidade de vida da sociedade diretamente no Portal de Periódicos Capes, onde é possível acessar diversas publicações. A segunda busca, de caráter mais restritivo, foi realizada na base de dados da *Web of Science*, procurando apenas artigos relacionados ao tema.

A busca mais abrangente, no Portal de Periódicos Capes, acesso via CAFE (Comunidade Acadêmica Federada) foi realizada com as palavras chaves: “*atmospheric particulate matter AND metals*”. O idioma não foi seletivo, porém coletou-se os dados dos últimos 20 anos a cada 2 anos, que foram apresentados no Gráfico 1. Encontrou-se o total de 14.630 publicações nos últimos 20 anos que associam os termos metais e material particulado atmosférico.

Gráfico 1- Número de publicações de 01/01/2001 a 04/02/2021 relacionados aos termos metais e material particulado atmosférico encontrados no Portal de Periódicos Capes.

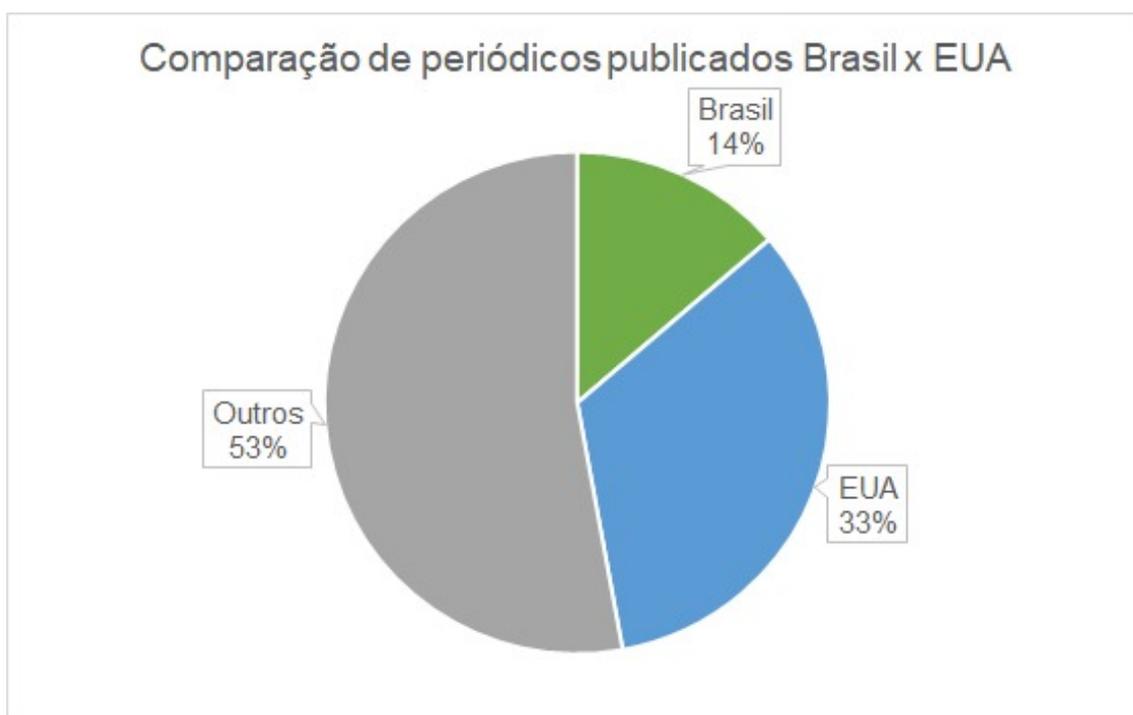


Fonte: Gráfico elaborado pela autora com dados do Portal de Periódicos Capes (2021).

De acordo com um levantamento mais específico realizado ainda no Portal da Capes com as palavras chaves “*metals atmospheric matter particulate*” AND “*Brazil*”, foram encontradas 2.008 publicações relacionadas ao tema, contudo se pesquisado “*metals atmospheric matter particulate*” AND “*United*

States”, foi possível encontrar 4.886 periódicos. Ambas possuem representatividade do total de 14.630 periódicos encontrados nos últimos 20 anos em escala global sobre o mesmo assunto, que estão representados no Gráfico 2.

Gráfico 2- Contribuição do Brasil e dos EUA nas publicações de artigos que abordam a presença de metais em material particulado quando comparado com as publicações no mundo até 04/02/2021.



Fonte: Gráfico elaborado pela autora com dados do Portal de Periódicos Capes (2021).

Com o objetivo de conhecer apenas o número de artigos relacionados à presença de metais no material particulado realizados no Brasil, utilizou-se a base de dados *Web of Science* com os tópicos “*atmospheric matter particulate*” AND “*metals*” AND “*Brazil*”, e foram encontrados o total de 55 artigos, que foram selecionados e utilizados para discussões comparativas nesse trabalho.

As legislações nacionais e internacionais que dispõem sobre os padrões de qualidade e emissões do ar foram pesquisadas e consultadas em sites governamentais. As outras informações foram encontradas em materiais nos sites Portal de Periódicos da Capes e *Google Scholar* utilizando descritores relacionados ao tema de interesse e em livros especializados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico foi realizada uma revisão de estudos bibliográficos referentes à qualidade do ar com ênfase no material particulado atmosférico. Os objetivos dessa revisão englobam o levantamento bibliográfico sobre composição do material particulado atmosférico, dos métodos de preparo de amostra, das técnicas analíticas empregadas na determinação de sua composição e dos efeitos sobre a saúde e meio ambiente que o material particulado promove.

3.1. QUALIDADE DO AR

A qualidade do ar que respiramos está diretamente relacionada com sua composição e com os mecanismos de dispersão desses no ar de forma a não comprometer as condições ideais à vida humana.

A atmosfera é uma camada de ar que envolve a Terra e que é retida através da força gravitacional, é formada por gases, sólidos e líquidos, que interagem entre si e provocam reações químicas. Sua constituição se baseia majoritariamente, excluindo-se o vapor de água, por gás nitrogênio (N_2), gás oxigênio (O_2), gás argônio (Ar) e gás dióxido de carbono (CO_2). Emissões atmosféricas naturais e antropogênicas podem liberar para a atmosfera outros gases e vapores, bem como partículas sólidas, as quais podem permanecer suspensas na atmosfera por algum tempo variando de minutos a meses, dependendo do tamanho de partícula e das condições meteorológicas. Além disso possuem os compostos líquidos, que são gotículas da condensação do vapor de água, chuva ou neblinas (BRITO, ARAÚJO, SILVA; 2018)

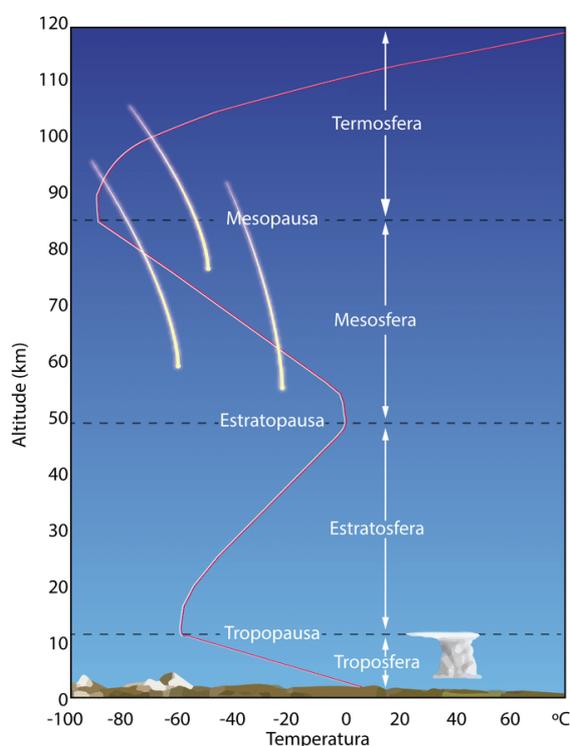
A atmosfera é classificada de acordo com a variação da temperatura com o aumento da altitude em relação à Terra, e é subdividida em cinco camadas, sendo elas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. Na Figura 1 é possível observar o comportamento da temperatura do ar de acordo com o aumento da altitude nas quatro camadas mais próximas da superfície (LENZI; FAVERO, 2019).

A troposfera é a região mais próxima da Terra, é delimitada em até 11 km de altitude e possui gradiente térmico vertical positivo de temperatura. Esta é a camada de ar em contato direto do homem com o ambiente, única camada que

é possível respirar normalmente, e conseqüentemente onde estão concentrados majoritariamente os gases nocivos resultantes das atividades antrópicas. É na troposfera que ocorrem as principais mudanças climáticas da atmosfera, a poluição do ar pode provocar chuvas ácidas, *smog* fotoquímicos, e acúmulo de poluentes (PEDROSO, 2007; SILVA; CHAVES; LIMA, 2009).

A camada limite planetária é delimitada de 1 a 2 km da troposfera, sendo abaixo dela a região mais dinâmica da atmosfera, pois há movimentos turbulentos verticais e horizontais, com gradientes de temperatura, que influenciam o comportamento dos gases poluentes (GUERRA, 2008).

Figura 1- Perfil vertical da atmosfera.



Fonte: (FONTENELLE, 2019).

O perfil adiabático seco do ar, no inferior da atmosfera, é de $-0,98^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ de altitude, isto é, quanto maior a distância da Terra, o ar se torna mais frio, neste caso a estabilidade do ar é neutra e ela pode ser caracterizada por ventos fortes e céu nublado. Porém, o mecanismo da inversão térmica ocorre quando há camada de ar quente acima do ar frio, sendo a mais fria, mais próxima da Terra. Esse fenômeno é natural, comumente encontrado no amanhecer e entardecer, porém, é prejudicial à dispersão dos poluentes, quando prolongado,

pois a camada de ar quente impede os movimentos de ar efetivos (ALMEIDA, 1999; GUERRA, 2008).

Quando a relação entre temperatura e altitude possuir uma variação negativa menor que a taxa adiabática ideal do ar ($-0,98^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), o ar possuirá um perfil estável, com alta radiação solar e baixas velocidades de vento. Contudo, se não há radiação solar, nem convecção do ar, e conseqüentemente, nem troca de calor entre as camadas, estabelece-se condições isotérmicas e a estabilidade do ar aumenta, caracterizando menor diluição e transporte dos poluentes (ALMEIDA, 1999).

3.1.1 Poluentes atmosféricos

O CONAMA, nº 491 de 2018 define o cenário de uma poluição do ar crítica como:

situação caracterizada pela presença de altas concentrações de poluentes na atmosfera em curto período de tempo, resultante da ocorrência de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos mesmos (MMA, 2018).

E poluentes atmosféricos são:

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 (MMA, 2018).

Quando poluentes são lançados na atmosfera, podem sofrer diversos mecanismos simples, que se associados, se tornam muito complexos. De acordo com De Nevers (1995) e Seinfeld (1995), o processo de poluição do ar se resume a três etapas, representadas na Figura 2. A primeira é a emissão de poluentes, que pode ser de fontes estacionárias ou móveis, a segunda etapa é a do transporte ou dispersão, que varia de acordo com as condições meteorológicas e direção dos ventos, a terceira é a imissão, ou recepção que causa efetivamente o impacto ambiental (ALMEIDA, 1999).

Figura 2- O processo de poluição ambiental.



Fonte: (CAPANEMA, 2018) – adaptado.

A recepção do ar contaminado está diretamente relacionada com a concentração de poluentes emitidas pelas fontes e pela dispersão efetiva ou não do ar. Se as concentrações ultrapassarem os padrões pré-determinados e a dispersão não for efetiva, a qualidade do ar será comprometida, podendo impactar à saúde dos seres humanos e causar danos à fauna e flora.

Os níveis de poluição atmosférica são definidos de acordo com as concentrações médias de poluentes por um período de tempo regulamentados pelo CONAMA 491 de 19 de novembro de 2018. Os compostos que são tidos como principais e indicadores da qualidade do ar são o monóxido de carbono (CO), o dióxido de enxofre (SO₂), o óxido de nitrogênio (NO), o dióxido de nitrogênio (NO₂), os hidrocarbonetos (HC), o ozônio (O₃) e o material particulado (MP) (MMA, 2018).

Os poluentes podem ser classificados como orgânicos e inorgânicos, naturais ou antrópicos, e primários ou secundários. Sendo os primários, os que permanecem na atmosfera como foram emitidos, e os secundários são resultantes da interação física e química dos poluentes primários na atmosfera (CETESB, 2021).

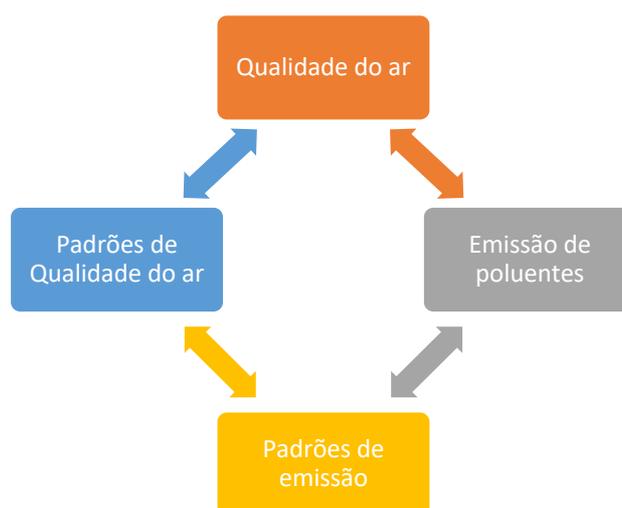
As fontes emissoras de poluentes podem ser móveis ou estacionárias, as emissões veiculares, por exemplo, são provenientes de fontes móveis, enquanto as emissões industriais ou chaminés são denominadas fontes estacionárias ou fontes fixas (CAMARA, 2018).

De acordo com Andrade *et al* (2017), as principais fontes de poluentes na cidade de São Paulo, Brasil, são em primeiro plano as emissões veiculares, de automóveis leves e pesados, e em segundo plano, as emissões industriais. A análise de uma única fonte, comumente encontrada em micro ou pequenas empresas, não demonstra o real impacto na região estudada, pois pequenas fontes podem causar grandes impactos, quando próximas ou submetidas a condições inadequadas para a dispersão dos poluentes (NETO *et al*, 2015).

3.1.2 Padrões de Emissão

A qualidade do ar está diretamente relacionada com a emissão de poluentes. Para que a poluição do ar não estabeleça um cenário crítico, é necessário que os órgãos ambientais definam padrões de emissões por fontes poluidoras. O monitoramento da qualidade do ar, com os padrões de qualidade, é uma ferramenta para acompanhar os níveis de poluição. Essa relação entre padrões de emissão e padrões de qualidade do ar está esquematizada na Figura 3.

Figura 3- Relação entre a qualidade do ar e padrão de emissão.



Fonte: (DERISIO, 2004).

O Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) constitui órgãos responsáveis pela proteção ambiental como o CONAMA. O Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR) foi instituído pelo CONAMA para estabelecer padrões e especificar as emissões de poluentes no ar no Brasil permitindo o desenvolvimento econômico e social do país. Em Minas Gerais o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) são os órgãos responsáveis por deliberarem as diretrizes para o controle e estabelecer níveis da qualidade do ar (FEAM, 2021).

A legislação ambiental é aplicada em âmbito federal, estadual e municipal em uma hierarquia restritiva, sendo a municipal sempre mais restritiva que a federal, pois esta leva em consideração a problemática regional (POZZA, 2005).

Os padrões de emissão são limites máximos de poluentes permitidos para lançamento no ar por fontes móveis ou fixas, as principais legislações que determinam limites de poluentes estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1- Principais legislações brasileiras que determinam limites de emissão de poluentes.

Resolução	Descrição	Atividades a que se aplica
Nº 08/1990	Dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição.	Geração de energia por combustão externa (novas fontes fixas) com potências nominais totais até 70 MW e superiores.
Nº 316/2002	Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos	Tratamento e gestão de resíduos perigosos – Incineradores.
Nº 382/2006	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas depois de 2007.	Processos de geração de calor a partir de combustões e processos expressamente listadas na Deliberação Normativa (DN). ¹
Nº 386/2006	Altera o art. 18 da Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002.	Tratamento e gestão de resíduos perigosos – Incineradores.
Nº 436/2011	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007.	Iguais as da DN CONAMA Nº 382/2006
Nº 499/2020	Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer.	Produção de clínquer – Cimenteiras.

Legenda: ¹As combustões e processos listados na DN CONAMA 382/2006 são: Combustão externa por óleo combustível; Combustão externa por gás natural; Combustão externa por bagaço de cana de açúcar; Combustão externa por derivados de madeira; Turbinas a gás para geração de energia elétrica; Processos de refinarias de petróleo; Fabricação de celulose; Fusão secundária de chumbo; Indústria de alumínio primário; Forno de fusão de vidro; Indústria de cimento Portland; Produção de fertilizantes, ácido fosfórico, ácido sulfúrico e ácido nítrico; e Indústrias siderúrgicas e usinas de pelotização de minério de ferro.

A Resolução CONAMA nº 382, de 26 de novembro de 2006, estabelece os limites nacionais de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas depois de 2007, enquanto que a de nº 436, de 22 de dezembro de 2011, inclui os limites de emissão para fontes instaladas antes de 2007, porém ambas abordam apenas treze delimitações de processos potencialmente poluentes. Os padrões variam de acordo com o tipo de processo e ou combustível utilizado na fonte (CONAMA, 2006; CONAMA, 2011).

Em Minas Gerais a COPAM nº 187, de 19 de setembro de 2013, dispõe sobre os limites de emissão para diversas fontes fixas no estado, e conforme preconizado no artigo 1º da Deliberação Normativa 187/2013 para as fontes de poluição para as quais não foram estabelecidos padrões de emissão, deverão ser observados os padrões recomendados ou aceitos internacionalmente (COPAM, 2013).

A *Technical Instructions on Air Quality Control* (TA-Luft) é uma lei federal alemã que dispõe sobre o controle de poluição do ar, que 24 de julho de 2002 recebeu a última revisão e é atualmente uma referência na Europa e adotada por diversos países do mundo para controle de emissões atmosféricas (TELES, 2015). Ela aborda padrões de emissão de metais na forma particulada, gasosa ou por aerossóis, incluindo o arsênio (As), o chumbo (Pb), o cádmio (Cd), o cromo (Cr), o níquel (Ni) o mercúrio (Hg), o selênio (Se) o telúrio (Te), o tálio (Tl) e vanádio (V) como compostos inorgânicos que possuem relevância ambiental, conforme descritos no Quadro 2 (KELLER LUFTECHNIK, 2020).

Quadro 2- Padrões de emissão de metais da TA-Luft.

Classificação	Categorias	Elementos	Taxa de Emissão (kg/h)	Concentração máxima (mg/Nm ³)
Inorgânicos em MP	Categoria I	Hg, Tl	0,25	0,05
	Categoria II	Pb, Co, Ni, Se, Te	2,5	0,5
	Categoria III	Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn	5,0	1,0
Cancerígenos em MP	Categoria I	As, Cd, Co, Cr (VI)	0,15	0,05
	Categoria II	Ni	1,5	0,5

Fonte: (KELLER LUFTECHNIK, 2020).

Além dela, a EPA possui uma lista de poluentes tóxicos atmosféricos que incluem 187 espécies diferentes, entre essas estão 11 metais ou metaloides (Sb, As, Cd, Cr, Co, Pb, Mn, Hg, Ni e Se). Todos apresentam limite de emissão médio, de três meses, de 0,015 mg/m³ de concentração (BRITO, ARAÚJO, SILVA; 2018).

3.1.3 Dispersão do Ar

A dispersão de poluentes de forma efetiva na atmosfera promove a diluição de altas concentrações de gases nocivos no ar e conseqüentemente diminui os seus impactos na vida humana. O maior objetivo na análise da dispersão atmosférica está relacionado com a preservação da saúde e bem-estar do ser humano, e do ambiente no qual ele vive (BARBON; GOMES, 2010).

A direção e a velocidade dos ventos determinam a região local mais afetada pela vazão de dispersão dos poluentes lançados na atmosfera. Quando o vento está calmo ou encontra muitos obstáculos em sua direção a dispersão dos poluentes se torna um processo lento. Logo, em regiões urbanas, onde há maiores concentrações de arranha-céus, os poluentes tendem a se acumular, tornando a qualidade do ar crítica (TRINDADE, 2013).

A turbulência é a movimentação do ar de maneira irregular, com rápidas alterações de velocidade e direção dos ventos, e pode ser por dois processos, ou mecânica ou convectiva. Se a turbulência ocorre predominantemente na

horizontal, não há gradiente de temperatura relevante entre as camadas de ar para ocorrer a sua movimentação vertical, por isso são chamadas de mecânicas. As turbulências mecânicas são associadas às características topográficas da região, isto inclui, mas não se limita, à rugosidade da superfície. Já as turbulências convectivas são fluxos de ar que se movimentam na vertical, onde as correntes de ar aquecido são ascendentes e as de ar resfriado as descendentes (ALMEIDA, 1999).

Os fatores importantes para a turbulência do ar, e utilizadas para a determinação da camada limite planetária são: o albedo que se refere a fração da radiação solar incidente que não foi absorvida e sim refletida pela superfície, a razão de Bowen que é a razão entre o calor sensível e o calor latente, e a rugosidade da superfície que está relacionada com a altura dos obstáculos que diminuem a velocidade dos ventos (EPA, 2018).

O comprimento de Obukhov, \mathcal{L} , é o parâmetro utilizado para prever a turbulência no ar, principalmente abaixo da camada limite planetária, e relaciona as variáveis das turbulências mecânicas e convectivas. Pode ser calculado a partir da Fórmula 2. Sendo u^* a velocidade de fricção, θv a temperatura potencial virtual média, $(\omega'\theta'v)_s$ o fluxo superficial da temperatura potencial virtual e kg a constante de Von Kármán (EPA, 2018).

$$\mathcal{L} = - \frac{u^* \theta v}{kg(\omega'\theta'v)_s}$$

Fórmula 1

Os modelos matemáticos de dispersão atmosférica utilizam de linguagens computacionais para caracterizar o perfil de plumas de dispersão emitidos por uma fonte e são ferramentas no processo de adequação de emissões de contaminantes às diretrizes contidas no PRONAR (MMA, 2018).

Inventários de emissões de gases poluentes são ferramentas utilizadas para fornecer os dados de entrada em modelos matemáticos aplicados para a análise da qualidade do ar. Existem algumas plataformas, como a EPA, que fornecem a alocação temporal, espacial e o perfil de especiação de cada emissão. Os fatores de emissões industriais da EPA estão descritos no AP-42 que é um compilamento robusto que contribui para os inventários de processos

industriais. O nível de detalhamento do inventário de emissão determinará a propriedade dos resultados obtidos pela modelagem do ar (EPA, 2017).

Com base em dados experimentais ou estimativas das emissões e os dados meteorológicos, um modelo pode ser projetado para determinar concentrações de diferentes poluentes e identificar áreas que possuem ou possuem qualidade do ar crítica (EPA, 2020). Tais estimativas são baseadas em dados coletados experimentalmente de fontes e emissões semelhantes ao analisado, e mesmo possuindo nível de imprecisão maior do que as análises experimentais, são mais baratas e auxiliam na gestão da qualidade do ar, facilitando o planejamento de medidas mitigadoras no controle da poluição (FEAM, 2015).

O software AERMOD (*American Meteorological Society/ Environmental Protection Agency Regulatory Model*), foi desenvolvido pela Sociedade Americana de Meteorologia (MAS) e é continuamente atualizado e alimentado por pesquisadores ambientais. Pode ser definido como um sistema modelador de pluma atmosférica em estado estacionário que processa as concentrações médias por receptor em um determinado período de tempo. O perfil da pluma é dependente da turbulência, da camada limite planetária e de conceitos de escala territoriais (EPA, 2016; EPA, 2018).

O AERMOD possui dois pré-processadores, o AERMET e o AERMAP. O AERMET está relacionado com os dados meteorológicos necessários para a definição das características de superfície e camada limite planetária (EPA, 2016; EPA, 2018). O AERMAP, gera uma malha com receptores com alturas influentes e receptores sensíveis, como escolas, hospitais e grandes áreas habitacionais, a fim de evidenciar a atenção para o controle quanto à qualidade do ar (EPA, 2016).

O modelo matemático é baseado na equação da pluma gaussiana, que assume que a dispersão do poluente de uma fonte com emissão contínua tem no ar uma distribuição normal ao eixo da pluma, tanto no plano horizontal como no vertical. Assim sendo, o cálculo da concentração final de um determinado poluente é resultado da Fórmula 2 (RIBEIRO; FERREIRA; SANTOS, 2019)

$$C(x,y,z) = \frac{FD}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

Fórmula 2

Legenda:

x,y= coordenadas cartesianas que identificam o ponto analisado;

z= altitude média da célula do ponto analisado, em relação ao nível do mar.

Q= taxa de emissão do poluente na fonte catalogada;

u_s = velocidade média do vento na altura de emissão;

σ_y = parâmetro de distribuição na direção lateral ao eixo da pluma;

y = distância ortogonal ao eixo da pluma do ponto analisado à fonte emissora;

h = altura efetiva de emissão da fonte;

σ_z = parâmetro de distribuição na direção vertical ao eixo da pluma; F = fator de correção para diferentes tempos de amostragem;

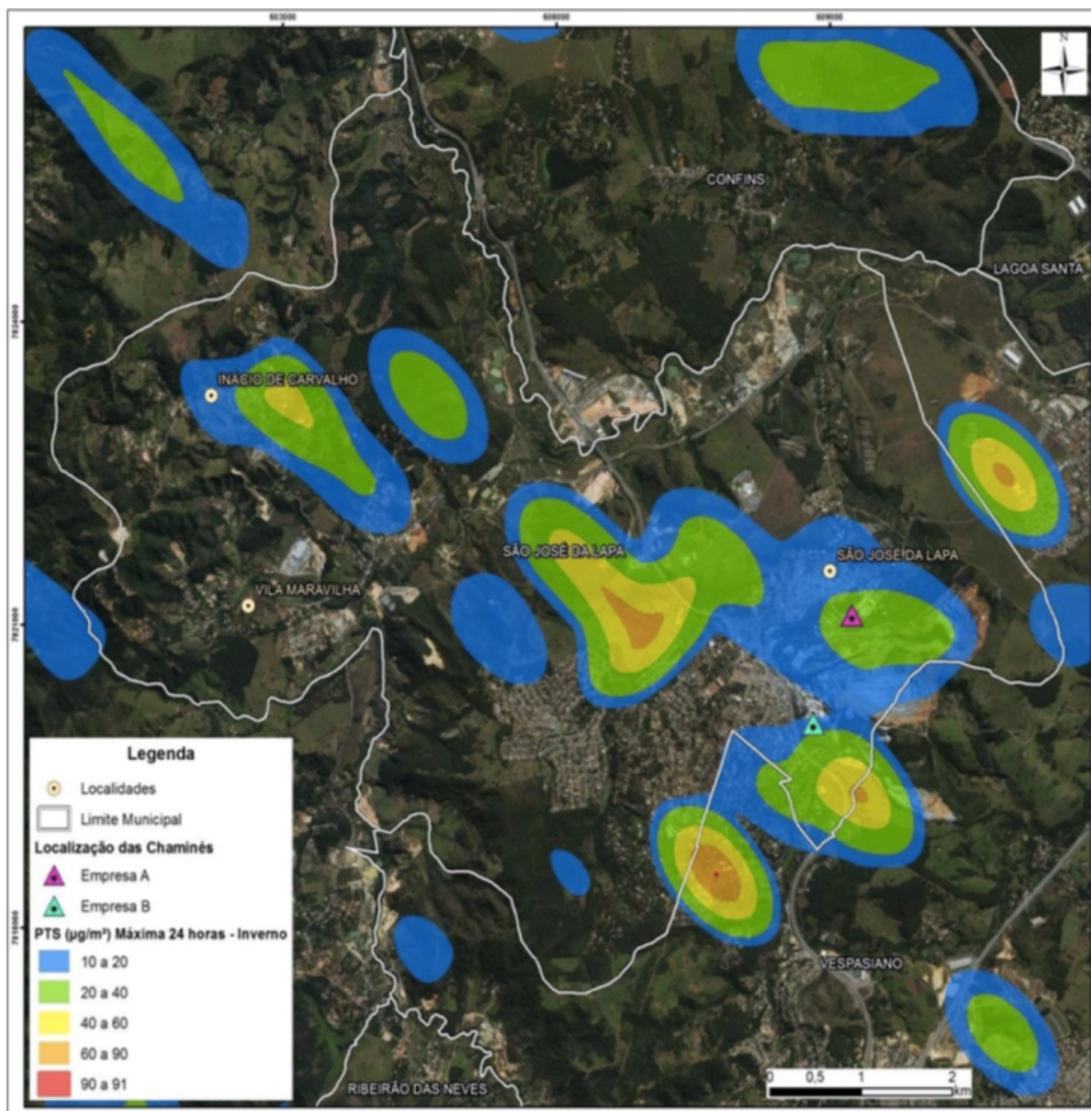
D = termo de decaimento do poluente considerado.

O uso do software para a análise da dispersão atmosférica é recomendado pela US-EPA (*United States Environmental Protection Agency*) para simulação do comportamento dos contaminantes gasosos para distâncias de até 50 km do local de estudo e para análises dos processos de licenciamento ambiental do estado de empreendimentos gerais (EPA, 2017) (FEAM, 2019).

De forma a conhecer o impacto de duas mineradoras na região de São José da Lapa/ MG em 2016, Ribeiro, Ferreira e Santos (2019) realizaram a modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos utilizando o AERMOD, que possibilitou estimar a amplitude da pluma de contaminação que atinge a região.

O principal poluente dessas mineradoras são os materiais particulados oriundos do beneficiamento mineral. A pluma obtida da máxima diária de 24h, para o período de seca (inverno) onde a dispersão é mais complexa, para o comportamento das partículas totais em suspensão (PTS), está exemplificada na Figura 4 (RIBEIRO; FERREIRA; SANTOS, 2019).

Figura 4- Pluma de dispersão de PTS durante o inverno de 2016 na região de São José da Lapa.



Fonte: (RIBEIRO; FERRIERA; SANTOS, 2019).

Como a análise foi estimada para o período de baixa umidade, pouca precipitação, constatou-se uma piora na dispersão dos materiais particulados no ar. A concentração máxima em 24 horas foi entre 90 e 91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo caracterizada como qualidade do ar ruim¹. Ainda é possível observar que as plumas alcançaram longas distâncias das fontes emissoras, e que o cenário se mostra mais crítico na região oeste das mineradoras, pois a direção dos ventos possuía origem a leste (RIBEIRO; FERRIERA; SANTOS, 2019).

¹ Ruim de acordo com o Índice de Qualidade do Ar, apresentados no tópico 3.1.4.

De acordo com Ribeiro, Ferreira e Santos (2019), o cenário da qualidade do ar no município de São Jose da Lapa é delicado e requer medidas incisivas para o controle da poluição do ar, já que o estudo não levou em consideração todas as fontes e emissões da região, o que se fossem consideradas, o resultado seria mais crítico para a qualidade do ar.

3.1.4 Padrões de Qualidade do Ar

Os padrões de qualidade do ar têm objetivo de estabelecer uma gestão de forma sistemática que são fundamentais para a preservação da saúde da população e do meio ambiente, pois está relacionada com a recepção dos poluentes em seres vivos. Desta forma, a Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, que dispõe sobre padrões de qualidade do ar no âmbito federal, de acordo com o Quadro 3, e os divide em duas categorias:

- a) Padrões de qualidade do ar intermediários (PI): padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas, que são PI-1, PI-2 e PI-3;
- b) Padrão de qualidade do ar final (PF): valores guia definidos pela Organização Mundial da Saúde - OMS em 2005.

A diferenciação do diâmetro das partículas de material particulado é essencial para o controle deste parâmetro, pois quanto menores, mais prejudiciais à saúde. De acordo com a EPA os materiais particulados atmosféricos podem ser classificados em quatro classes de acordo com o seu tamanho, a saber MP_{0,1} ou ultrafinas ($d \leq 0,10 \mu\text{m}$), MP_{2,5} ou partículas finas ($d \leq 2,5 \mu\text{m}$), MP₁₀ ou partículas inaláveis ($d \leq 10 \mu\text{m}$) e PTS ou partículas totais em suspensão ($d \leq 50 \mu\text{m}$) (EPA, 2021; BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018).

Para os poluentes monóxido de carbono (CO), partículas totais em suspensão (PTS) e Chumbo (Pb) são adotados os padrões de qualidade do ar final (PF). Os demais poluentes seguem o padrão PI-1, vigente atualmente. Vale ressaltar que as etapas PI-2, PI-3 não têm data prevista para serem aplicadas (MMA, 2018).

Quadro 3- Padrões de Qualidade do Ar da CONAMA 481/ 2018.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	PF
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	ppm
Material Particulado - MP10	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP2,5	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora ²	260	240	220	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	-
Ozônio - O ₃	8 horas ³	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	0,5	-

Fonte: (MMA, 2018).

Legenda:

- 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;

A FEAM utiliza cálculos para estabelecer os Índices de Qualidade do Ar (IQAr), convertendo as concentrações dos poluentes atmosféricos nas escalas boa, moderada, ruim, muito ruim e péssima com o objetivo de facilitar o entendimento dos níveis de qualidade do ar diários e estabelecer uma comparação para todos os parâmetros, em valores adimensionais, conforme mostra a Figura 5. A escala do IQAr varia de 0-500 e é determinada a partir da Fórmula 1 (FEAM, 2021).

$$IQAr = \frac{Ii + (If - Ii)x (Cm - Ci)}{Cf - Ci}$$

Fórmula 3

Legenda:

Índice inicial (I_i)= valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa;

Índice final (I_f)= valor do índice que corresponde à concentração final da faixa;

Concentração medida (C_m)= concentração medida;

Concentração inicial (C_i)= concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida;

Concentração final (C_f)= concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida.

Figura 5- Índices de qualidade do Ar (IQAr).

Qualidade do Ar	Índice	MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	MP _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h
N1 - Boa	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N2 - Moderada	41 - 80	>50 - 100	>25 - 50	>100 - 130	>9 - 11	>200 - 240	>20 - 40
N3 - Ruim	81 - 120	>100 - 150	>50 - 75	>130 - 160	>11 - 13	>240 - 320	>40 - 365
N4 - Muito Ruim	121 - 200	>150 - 250	>75 - 125	>160 - 200	>13 - 15	>320 - 1130	>365 - 800
N5 - Péssima	201 - 400	>250 - 600	>125 - 300	>200 - 800	>15 - 50	>1130 - 3750	>800 - 2620

Fonte: (FEAM, 2021).

Esta qualificação do ar está relacionada com os efeitos à saúde que as concentrações dos poluentes em geral provocam, os efeitos na saúde de acordo com o nível da qualidade do ar estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4- Qualidade do ar e feitos à saúde.

Qualidade/ Índice	Significado
N1- Boa 0-40	Não aplicável
N2- Moderada 41-80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
N3- Ruim 81-120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
N4- Muito Ruim 121-200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
N5- Péssima >200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: (CETESB, 2021).

3.1.5 Monitoramento de Material Particulado Atmosférico

As redes de monitoramento da qualidade do ar se fazem necessárias considerando a problemática dos compostos particulados suspensos no ambiente à saúde humana. As redes são compostas de estações que possuem equipamentos específicos para o monitoramento dos poluentes legislados. O monitoramento da poluição do ar envolve mediar a contaminação nas escalas de tempo e espaço. A amostragem das partículas é uma etapa crucial para a análise e deve ser representativa através do tempo de coleta ou de estimativas utilizando cálculos matemáticos (GUIMARÃES, 2017).

Os equipamentos que medem a poluição do ar podem ser passivos, ativos, automáticos ou remotos, e seu uso dependerá da metodologia a ser empregada. Os amostrados passivos e ativos possuem resoluções temporais e espaciais aceitáveis, possuem baixo custo e são fáceis de operar, porém não são aplicáveis a todos os poluentes e exigem análise dos dados coletados. Os amostradores automáticos possuem um custo maior, são utilizados para longos períodos de tempo, e possuem resposta em alta resolução temporal. Os sensores remotos são muito complexos e caros, porém têm se tornado uma alternativa viável, principalmente para monitoramentos de vários poluentes com um mesmo equipamento (LACAVA, 2003).

Uma forma alternativa de monitoramento de emissões atmosféricas consiste no biomonitoramento, cujos bioindicadores, específicos para determinados poluentes, acusam a presença de metais no ar. Como as bromélias e líquens que são utilizados para detectar a presença de metais tóxicos no estado de São Paulo. As vantagens desse uso são o fácil cultivo de bioindicadores e a indicação visual da poluição do ar, porém é um monitoramento muito específico e requer, ainda sim, o monitoramento da qualidade do ar (LISBOA; KAWANO, 2007).

O *Nacional Institute of Standards Technology* (NIST), é uma agência governamental americana que promove padrões de referência para diversos processos visando a segurança econômica e melhoria da qualidade de vida da população. O padrão de referência NIST 1649B se destina ao uso na avaliação de métodos para a determinação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), PAHs nitro-substituídos (nitro-PAHs), congêneres de bifenil policorado

(PCB), pesticidas clorados e de constituintes inorgânicos em material particulado atmosférico ou em matrizes semelhantes.

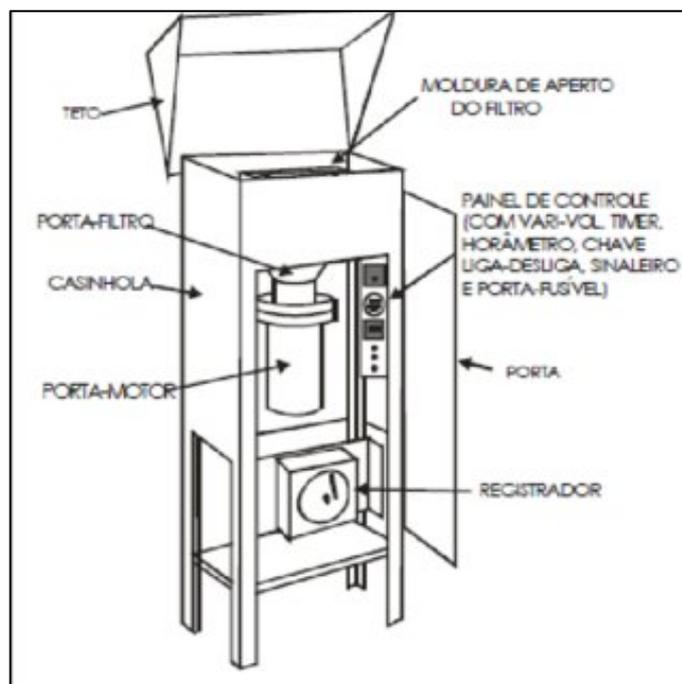
Os equipamentos utilizados para o controle de MP podem ser ativos e automáticos e devem estabelecer limites de quantificação e detecção com base nas especificações da amostra de material particulado. Os métodos de monitoramento podem ser divididos em duas partes: a captação de ar com os filtros coletores e os sistemas de análise das amostras coletadas. Podem ser considerados ativos os amostradores de grande volume (*high-vol*), médio volume (*médium-vol*) e pequeno volume (*low-vol*), sendo aplicáveis para medir concentrações integradas em períodos de 24 horas.

O Amostrador de Grande Volume (AGV) possui dois modelos, sendo o AGV PTS o que coleta partículas totais em suspensão representado na Figura 6, e o AGV MP₁₀ que é capaz de simular a respiração humana, pois coleta partículas inaláveis, representado na Figura 7 (LACAVA, 2003).

A norma ABNT NBR 9547 de 1997 especifica o método de ensaio para a determinação da concentração mássica de partículas totais em suspensão (PTS) no ambiente, por um período de amostragem determinado, utilizando o AGV PTS (ENERGÉTICA, 2021).

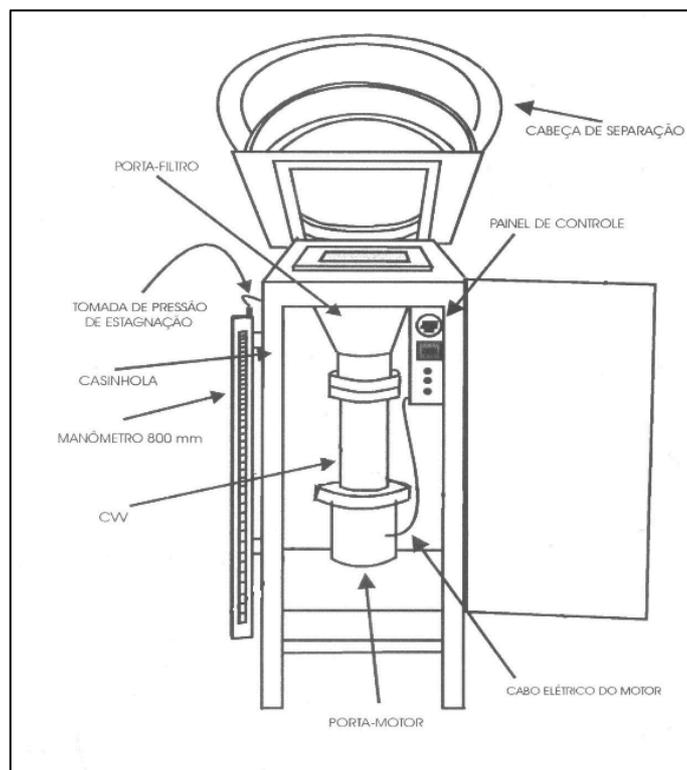
A norma ABNT NBR 13412 de 1995 prescreve o método para a determinação da concentração mássica de material particulado inalável em suspensão na atmosfera, em um período de amostragem determinado, utilizando o amostrador de grande volume acoplado a um separador inercial de partículas, o AGV MP₁₀ (ENERGÉTICA, 2021).

Figura 6- Exemplo de um amostrador de grande volume PTS.



Fonte: (ENERGÉTICA, 2021).

Figura 7- Exemplo de um amostrador de grande volume MP₁₀.



Fonte: (EXCELÊNCIA AMBIENTAL, 2021).

As principais características que diferenciam ambos os equipamentos estão relacionados com a entrada de ar no equipamento e ao regime de vazão. Suas estruturas se diferenciam apenas na separação do ar. O MP₁₀ possui uma cabeça de separação que é dotada de um conjunto de boqueiras que aceleram o ar de coleta para dentro de uma câmara de impacto, onde partículas maiores que 10µm ficam retidas numa camada oleosa e a fração de ar menor que 10µm é carregada para o filtro de coleta. (MARCON, 2013; GUIMARÃES, 2017).

Considerando a quantidade de volume coletado por esses equipamentos o método de análise mais utilizado é o gravimétrico, que determina a quantidade de amostra a partir da diferença da massa do filtro inicial e final e são expressas em microgramas por metro cúbico (µg/m³) (MARCON, 2013).

De acordo com Sampaio (2012), o filtro utilizado no procedimento de amostragem do ar de material particulado, deve ter uma eficiência mínima de 99,95% para retenção de partículas de até 0,3 µm de diâmetro e deve ser isento de metais em sua constituição, para não comprometer os resultados. Os filtros mais aceitos e utilizados são os de fibra de vidro ou micro quartzo (ENERGÉTICA, 2015). Os filtros de fibra de vidro apresentam zinco em sua composição e por isso não são os ideais para a determinação desse metal. (SAMPAIO, 2012).

As metodologias de análise recomendadas pela CONAMA 481/2018 para as partículas totais em suspensão (PTS) e material particulado inalável (MP₁₀ e MP_{2,5}) são respectivamente os amostradores de grandes volumes e a separação inercial com filtração gravimétrica (MMA, 2018).

Em todo o território estadual de Minas Gerais há 29 estações automáticas instaladas, sendo 10 apenas na região metropolitana de Belo Horizonte. As estações contêm monitores de partículas inaláveis, analisadores de gases, sensores meteorológicos e o sistema de aquisição e transmissão dos dados em tempo real para a FEAM (FEAM, 2021).

Os analisadores automáticos respondem rapidamente à análise, com médias de concentração de 30 ou 60 minutos e por isso são mais utilizados em redes de monitoramento, em tempo real. Os métodos de medições automáticas de MP podem ser por absorção de radiação β, espalhamento de luz e

gravimetria, utilizando TEOM (*Tapered Element Oscillation Microbalance*) (LACAVA, 2003).

No método de absorção de radiação β , a quantidade de radiação que passa por um filtro funciona como uma medida da concentração de massa de MP. Já no método TEOM, a amostra de ar passa por um filtro acoplado a um tubo oscilante, que coleta as partículas. Se a massa de amostra coletada aumenta a frequência do tubo diminui, relacionando a frequência e a massa, a fim de obter a concentração (LACAVA, 2003).

As condições meteorológicas são muito importantes no monitoramento da qualidade do ar, tais como os ventos, as temperaturas, incidência de radiação solar e taxas de umidade. Estações meteorológicas são essenciais para estudos relacionados à dispersão dos poluentes e devem ser incluídas na gestão da qualidade do ar (BRITO, ARAÚJO, SILVA; 2018).

3.2 MATERIAL PARTICULADO

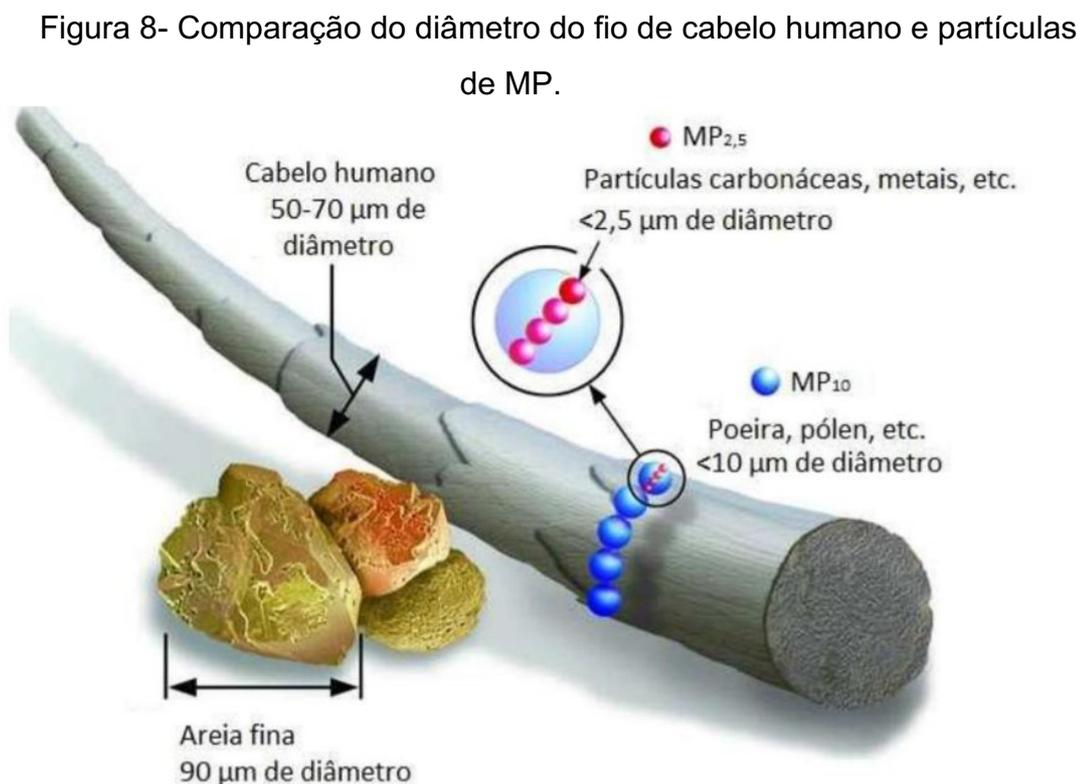
De acordo com a Resolução CONAMA nº 491 de 19 de novembro de 2018, material particulado é o conjunto de partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar e possuem diâmetro aerodinâmico que determina sua classificação.

3.2.1 Aspectos Gerais

O material particulado pode se apresentar na atmosfera como poeiras, fumos, fumaças ou névoas e possui processos de formação complexos, que não se limitam a concentração, mas também a diferenciação do diâmetro, a composição química e a morfologia. As poeiras são partículas sólidas formadas por processos de desintegração mecânica ($d \geq 10 \mu\text{m}$). Os fumos são partículas sólidas formadas por condensação de vapores ou são resultados de reações químicas, sendo geradas onde há volatilização de metais fundidos, como a solda elétrica ($d \leq 0,10 \mu\text{m}$). A fumaça consiste em partículas sólidas formadas pela queima de combustíveis fósseis ($d \pm 1 \mu\text{m}$). Por fim, as névoas são formadas por dispersão ou condensação de um líquido ($d \pm 5 \mu\text{m}$) (GUIMARÃES, 2017).

É possível comparar o diâmetro aerodinâmico das partículas de material particulado com um fio de cabelo humano, conforme a Figura 8. Um fio de cabelo

possui diâmetro entre 50 a 70 micrômetros, enquanto partículas inaláveis de MP possuem diâmetro menor que 10 micrômetros. Ou seja, os materiais particulados conseguem ter diâmetros bem menores que um fio de cabelo. As partículas PTS, MP₁₀ e MP_{2,5} possuem níveis de concentração máximos recomendados para os padrões de qualidade do ar na CONAMA nº 491/2018, explicitados no Quadro 3.



Fonte: (SANTOS, 2017).

Outro fator, associado ao diâmetro de MP é que quanto menor ele for, maior será a mobilidade da partícula e essa permanecerá por mais tempo na atmosfera, podendo atingir longas distâncias. Já as partículas maiores tendem a depositarem na superfície, sendo mais estáveis e menos perigosas para a saúde (SOUZA, 2017).

Os aerossóis ou material particulado também interferem na formação das nuvens, na precipitação e podem alterar a visibilidade e transparência da atmosfera. A redução de visibilidade, impede a passagem de radiação na atmosfera através de reflexão, dispersão e absorção. As partículas finas MP_{2,5} são as principais causadoras da redução da visibilidade, uma vez que por serem

menores permanecem mais tempo suspensas do ar, e não são tão afetadas pela força gravitacional (ALVES, 2005; SILVA, 2018).

As principais fontes de emissão de material particulado são as antrópicas, os considerados primários, são os resultantes dos processos industriais, dos veículos automotores, de queima de biomassa e da ressuspensão do solo provenientes de processos de mineração. Os materiais particulados de origem secundárias são as partículas oriundas das reações químicas entre os gases SO₂, NO_x e compostos orgânicos voláteis com o ar (CETESB, 2021).

Fajersztajn *et al* (2013) encontraram evidências epidemiológicas robustas que relacionam a poluição do ar com a mortalidade por câncer de pulmão, porém essa problemática tem sido subestimada pelas organizações de saúde no mundo, já que, estudos convencionais dos efeitos de material particulado são realizados onde as concentrações médias anuais variam entre 5 µg/m³ a 35 µg/m³, contudo, as concentrações deste mesmo parâmetro em centros urbanos populacionais como os da China, Índia e países em desenvolvimento são frequentemente mais altas que 100 µg/m³.

Romão *et al* (2013) observaram uma relação entre baixo peso de recém-nascidos e a exposição a material particulado no município de Santo André, São Paulo-BR. As concentrações de MP₁₀ em 37,50 µg/m³, isto é, dentro dos padrões de qualidade do ar, no terceiro trimestre gestacional aumentaram os riscos de baixo peso ao nascer em 26%.

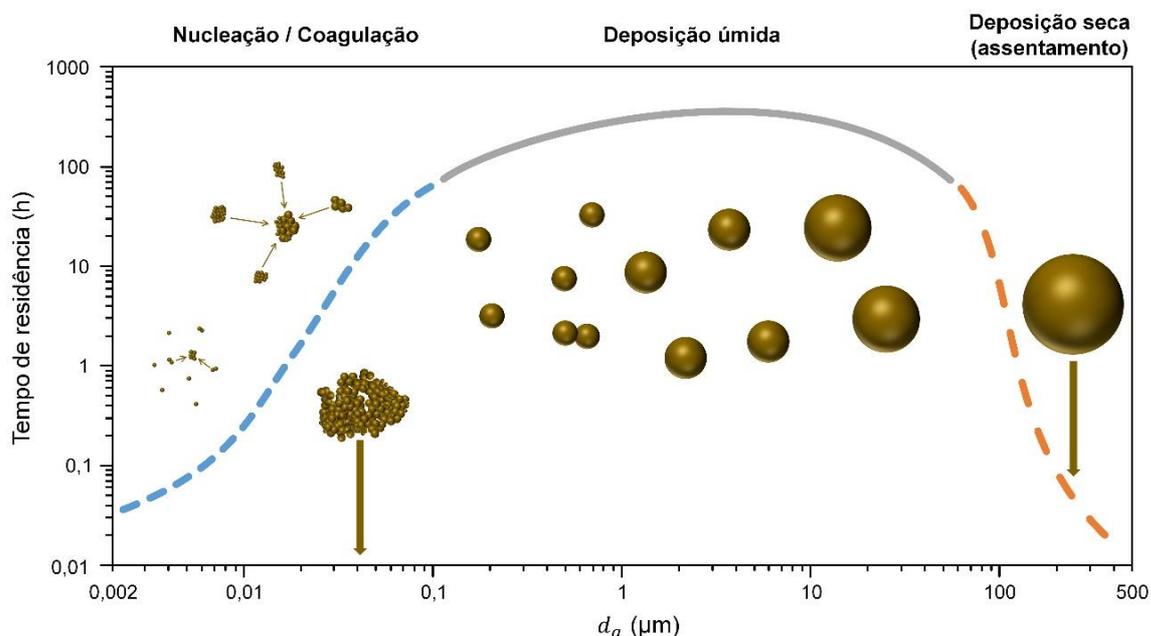
Em Itabira, Minas Gerais, foi possível constatar que o aumento de 10 µg/m³ no MP₁₀, oriundas de jazidas de minério de ferro extraídas em lavra mecanizada a céu aberto, provoca o aumento em 4% de atendimentos de pronto socorro por doenças respiratórias, no mesmo dia e no dia seguinte, para crianças menores de 13 anos e de 12% nos três dias subsequentes para adolescentes entre 13 e 19 anos (BRAGA, 2007).

Os processos de formação dos materiais particulados atmosféricos são complexos e podem ocorrer por nucleação ou coagulação. A nucleação consiste na formação de aglomerados de partículas finas, pela condensação de vapores. A coagulação é a junção de duas ou mais partículas pequenas que se colidem quando estão em movimento e se tornam maiores. Ambos os processos são responsáveis pela remoção de partículas que possuem diâmetro menores que

0,1 μm . A deposição é uma forma de remoção dos poluentes do ar, e pode ser seca ou úmida. Os materiais particulados formados pelo processo de nucleação e coagulação ou que já estejam dispersos na atmosfera que possuem diâmetro entre 0,1 μm e 10 μm , possuem maior tempo de retenção no ar e tendem a se depositarem na ocorrência de incorporações a gotas de chuvas ou deposição úmida. Já as com diâmetros maiores de 10 μm , tendem a se depositar de forma seca, pela ação da gravidade ou difusão térmica, e possuem rápido assentamento quando comparada com as partículas de diâmetro menores (BELO; TOFOLI, 2011; BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018).

Na Figura 9, a linha azul pontilhada representa a curva que as partículas de menores diâmetros serão removidas por coagulação, enquanto a linha pontilhada laranjada indica a remoção das partículas maiores por assentamento. A linha cinza representa as partículas inaláveis que permanecem cerca de 5 dias suspensas no ar. A Organização Mundial da Saúde recomenda que tais partículas sejam monitoradas, pois estão diretamente relacionadas com problemas de saúde (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018).

Figura 9- Relação entre o tempo de residência e o diâmetro aerodinâmico de MP.



Fonte: (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018).

3.2.2 Metais em material particulado atmosférico e seus efeitos na saúde

A composição química do material particulado pode ser orgânica ou inorgânica. As partículas orgânicas geralmente têm origem na combustão, nas transformações químicas em diferentes processos industriais, materiais biológicos e esfoliação de materiais poliméricos. As partículas classificadas como inorgânicas geralmente possuem concentrações em nível traço em material particulado atmosférico, e podem ser emitidos por fontes naturais como o Al, K, I, Na, Si, Fe e Cl, como também de atividades antrópicas como o Br, Cu, Mn, Ba, Zn, Mg, Pb, Ca, V, Ti, Be, Sn, Bi, Li, Cs, Cd, Co, Ni e Hg (GUIMARÃES, 2017; BRITO; ARAÚJO; SILVA, 2018; LENZI; FAVERO, 2019).

As formas de transporte desses compostos químicos pela atmosfera podem ser por absorção ou adsorção. As substâncias que se dissolvem no interior de uma partícula são absorvidas e as que somente se aderem à superfície são adsorvidas. As substâncias que são insolúveis, são transportadas envoltas em uma película de água pelo ar que também pode carregar outros compostos dissolvidos nela (BAIRD; CANN, 2011).

A fração do material particulado inalável, constitui a maior preocupação, pois tendem a permanecer mais tempo na atmosfera alcançando longas distâncias e devido à elevada superfície específica dos sólidos, são capazes de se associar a metais e carregá-los para o trato respiratório humano. Considerando que alguns metais são bioacumulativos, é possível que haja aparecimento de sinais crônicos de saúde na população afetada, mesmo que os metais em suspensão apresentem baixas concentrações (SAMPAIO, 2012). As principais ameaças e doenças relacionadas à exposição a metais estão descritos no Quadro 5.

Quadro 5- Efeitos à saúde por exposição a alguns metais.

(Continua)

Metais	Efeitos
Alumínio	Afeta o sistema nervoso, o músculo-esquelético e respiratório (do nariz aos pulmões).

Quadro 6- Efeitos à saúde por exposição a alguns metais.

(Continuação)

Metais	Efeitos
Cádmio	Conhecido por ser um cancerígeno humano, afeta principalmente o sistema cardiovascular, sistema nervoso, gastrointestinal, renal e sistema reprodutivo.
Chumbo	Muito tóxico ao sistema nervoso, causando fraqueza nos dedos, pulsos e tornozelos, pequenos aumentos de pressão arterial e anemia. Em mulheres grávidas, pode causar aborto ou má formação do feto. Risco de morte, se exposto a níveis elevados e cancerígeno a qualquer concentração.
Cobalto	Em elevadas concentrações pode causar problemas respiratórios, pneumonia e asma. É considerado cancerígeno.
Cobre	Atinge os órgãos digestivos e o sistema hepático e hematológico. Além disso, a exposição prolongada pode causar irritação nos olhos, boca e nariz, provocando dor de cabeça, tonturas, náuseas e diarreia.
Cromo	As formas mais comuns são o cromo (0), cromo (III) e o cromo (VI) que é considerada carcinogênica e afeta principalmente os sistemas: imunológico, renal e respiratório. Os problemas mais comuns podem ser: asma, falta de ar, irritações cutâneas, irritação da úlcera, anemia.
Manganês	Principais sistemas afetados: cardiovasculares, hepático, nervoso e respiratório. Esses efeitos sobre a saúde incluem mudanças de comportamento e outros efeitos no sistema nervoso, que incluem movimentos que podem tornar-se lento e desajeitado.
Níquel	Sistemas de órgãos afetados: cardiovasculares, cutâneo, imunológico e respiratório. Conhecido por ser um carcinogênico humano. O efeito prejudicial à saúde mais comum de níquel em seres humanos é uma reação alérgica, quando ocorre contato direto com o corpo.
Zinco	Sistemas de órgãos afetados: gastrointestinais, hematológico e respiratório. A inalação de grandes quantidades de zinco (como pó de zinco ou fumos de fundição ou soldagem) pode causar uma doença a curto prazo específico chamado febre do metal, que são geralmente reversíveis após a exposição ao zinco cessar. No entanto, muito pouco se sabe sobre os efeitos a longo prazo de respirar pó de zinco e vapores.

Fonte: (ASTDR, 2021).

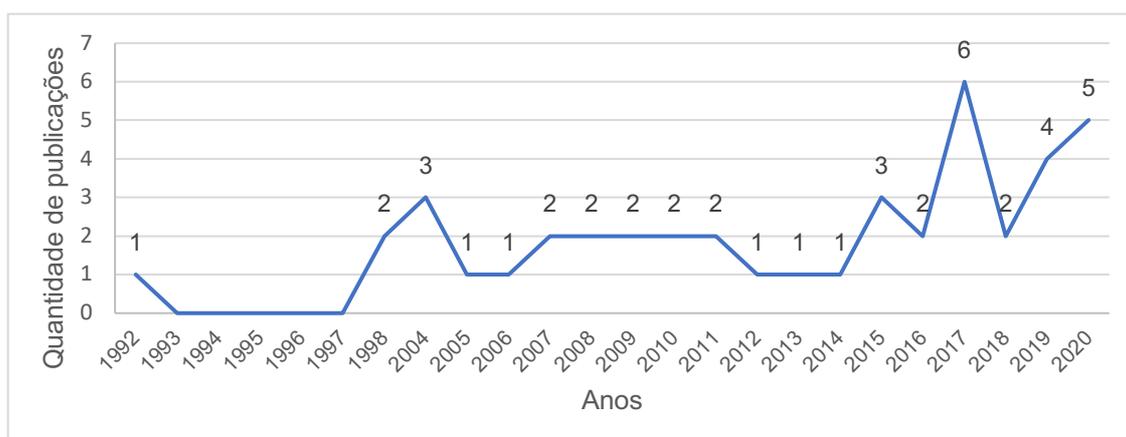
O chumbo (Pb) é o único metal previsto nos padrões de qualidade do ar no Brasil, isso porque é reconhecido pela OMS como um dos elementos químicos mais perigosos para a saúde humana. Seus efeitos nocivos podem

afetar praticamente todos os órgãos do corpo humano e são absorvidos principalmente nos tratos gastrointestinais e respiratórios, porém são nos ossos que são depositados. A proibição da adição de tetraetilchumbo na gasolina em alguns países, diminuiu a concentração de chumbo no material particulado no mundo, porém, não findou o aparecimento de teores desse metal em análises de composições de materiais particulados (VANZ; MIRLEAN; BAISCH, 2003).

3.2.3 Metais em material particulado atmosférico no Brasil

Diante da importância ambiental de conhecer a composição dos materiais particulados, em especial quanto à presença de metais, realizou-se uma consulta na base *Web of Science* sobre o tema. O período abrangido pelo banco de dados vai de 1945 a 2020. Os artigos foram agrupados segundo ano de publicação, tanto pelos números de publicações globais disponíveis e as que se limitam apenas ao Brasil. Realizou-se o levantamento de 55 artigos sobre estudos de metais em material particulado atmosférico no Brasil, após análise, retirou-se 12 artigos do conjunto de estudo, que apesar estarem relacionados com o tema, não abordam a determinação ou estudo de caso de metais em material particulado atmosférico no Brasil. Sendo assim, todos os resultados dessa pesquisa foram realizados com o total de 43 artigos e estão representados no Gráfico 3.

Gráfico 3- Redistribuição dos artigos em escala nacional de acordo com o ano de publicação.

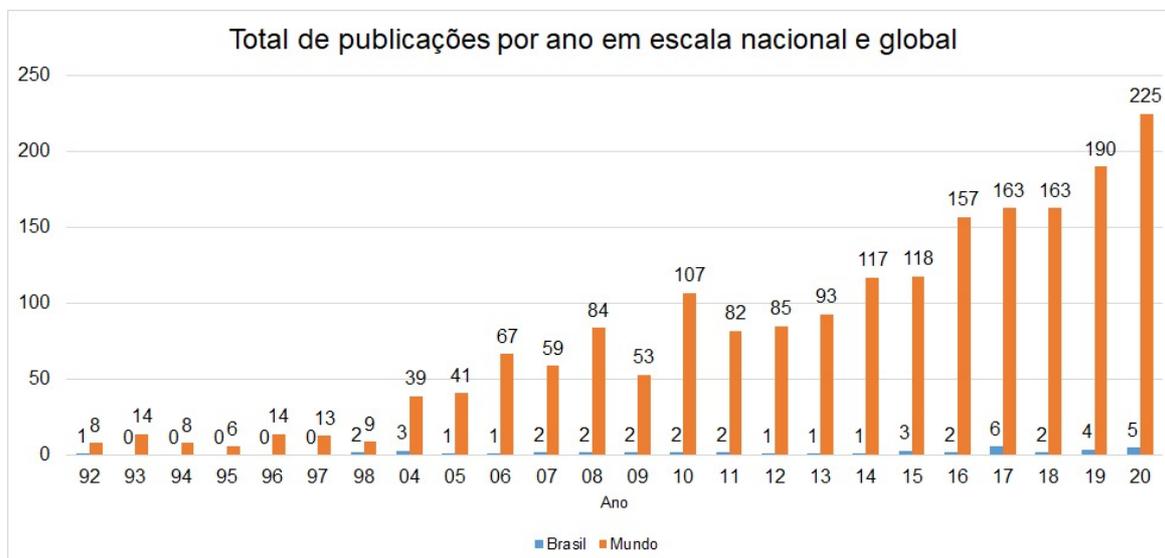


Fonte: Gráfico elaborado pela autora com dados da plataforma *Web of Science*.

O interesse pela presença, determinação e impacto de metais em material particulado atmosférico é notado em escala nacional a partir do início do século

XXI, recebendo um aumento de 50% depois do ano de 2014. Com o objetivo de comparar esses resultados com os apresentados pelos dados globais, plotou-se o Gráfico 4.

Gráfico 4- Redistribuição dos artigos em escala nacional e global de acordo com o ano de publicação.



Fonte: Gráfico elaborado pela autora com dados da plataforma *Web of Science*.

Observa-se no Gráfico 4 uma grande diferença dos números de publicações nacionais e globais sobre a presença de metais em material particulado. Contudo também é possível ressaltar o crescente interesse pelo tema, o que corrobora com a importância de conhecer a composição do ar que respiramos.

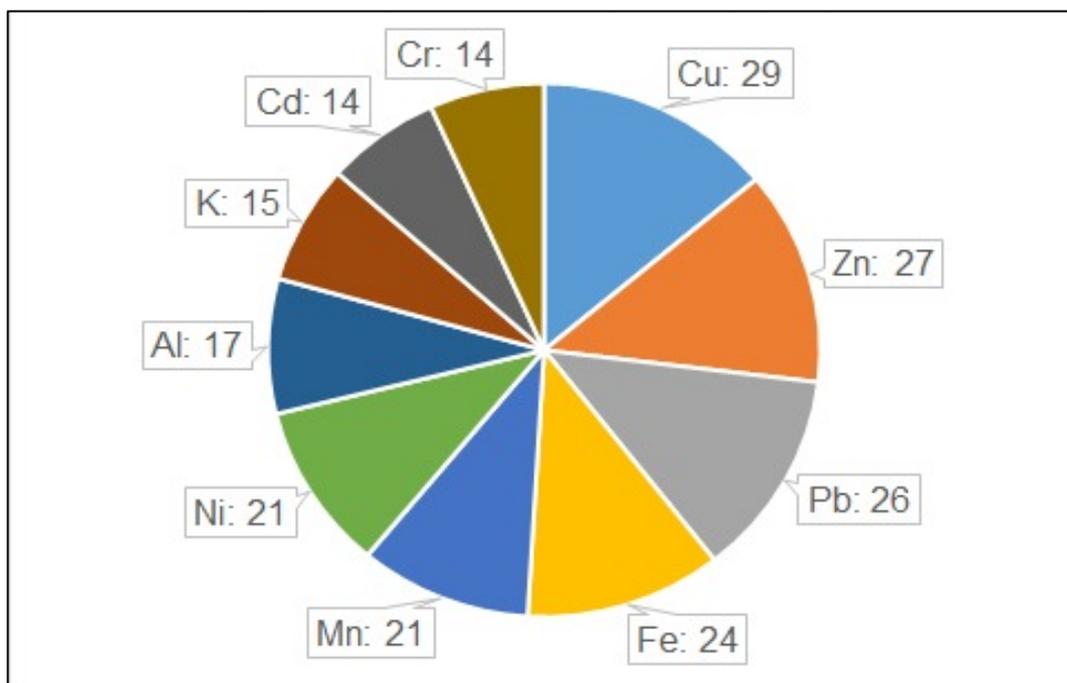
O primeiro artigo publicado no Brasil referente à composição elementar de material particulado atmosférico, com o título "*Origins of Atmospheric Particulate Matter Over the North-Sea and the Atlantic-Ocean*" foi em novembro de 1992, em que Lonso, Bergametti e Carlier (1992), coletaram por filtração o material particulado atmosférico durante o Cruzeiro ANTVII/1 que percorreu o Oceano Atlântico da Alemanha até o Rio Grande do Sul, Brasil. As análises, por Fluorescência de Raios-X com Energia Dispersiva, mostraram a presença de Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe e Zn nos aerossóis. Os autores também apontaram a influência relativa das principais fontes desses poluentes presentes no ar oceânico, que foram o solo desértico no Atlântico Norte tropical, as emissões antropogênicas no Mar do Norte e Canal da Mancha e a queima de

biomassa e atividade biogênica no Atlântico Sul Tropical, que são destinos próximos à rota traçada pelo cruzeiro.

O artigo com publicação mais recente, em novembro de 2020, tem como título “*Inflammation response, oxidative stress and DNA damage caused by urbana ir pollution exposure increasse in the lack of DNA repair XPC protein*”, que indica a ameaça dos metais presentes na composição atmosférica do estado de São Paulo, Brasil, à estrutura do DNA humano. Foram quantificados 24 elementos (Mg, Al, K, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sn, Pb, Li, Co, As, Se, Rb, Sr, Cd, Cs e Bi), que foram extraídos em meio ácido e digeridos em forno de micro-ondas, e determinados por Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS) (ALVES *et al*, 2020).

No que tange a emissão de materiais particulados, os principais metais encontrados e analisados no Brasil estão esquematizados no Gráfico 5, sendo o número na frente de cada elemento a frequência de aparição do metal nos artigos selecionados, como elemento de estudo.

Gráfico 5- Os 10 principais metais encontrados e analisados no MP brasileiro.



Fonte: Gráfico elaborado pela autora com dados da plataforma *Web of Science*.

A presença de metais como Cu, Zn, Pb, Ni, Cd e Cr é indicativo de emissões industriais e veiculares, incluindo o desgaste de pneus e pista (SANTIAGO, 2013). Os materiais particulados advindos de ressuspensão de poeira do solo, de construção e demolição, de emissões biogênicas e do sal marinho possuem composição muito similar àquelas da crosta terrestre, como o Fe, Al (SANTOS, 2017). O Mn é indicativo em ambas, quanto industriais e veiculares, tanto de origem natural. A aparição do K na classificação dos principais metais estudados no Brasil, é devido à sua associação com a queima de biomassa, tão comum no país (BEAL, 2017; OLIVEIRA, 2017).

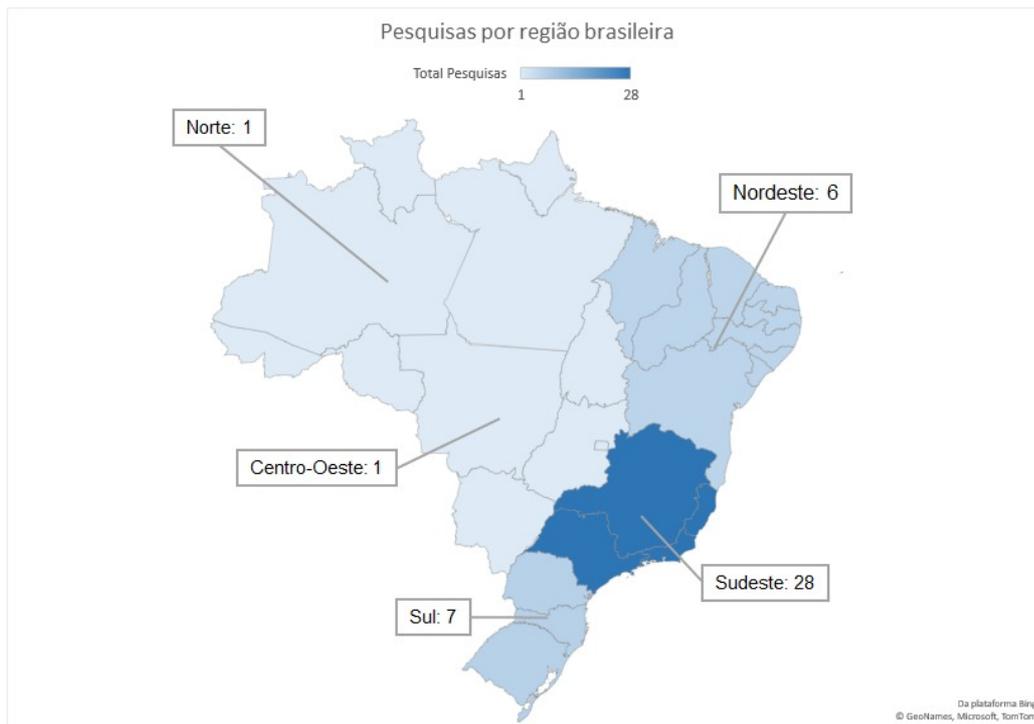
Em grandes centros urbanos o tráfego de veículos é responsável pela emissão de uma parte representativa de MP, tais partículas podem conter metais e metaloides oriundas dos produtos de combustão do combustível, do desgaste dos pneus, das lonas de freios, dos rolamentos, dos materiais de construção das vias e da ressuspensão do solo (MENDONÇA, 2013).

Nas indústrias metalúrgicas e siderúrgicas, conforme o minério de ferro passa pelo processo de beneficiamento, ocorre a liberação de material particulado pelas chaminés, que possuem composições e características distintas de acordo com o processo químico realizado. Essas partículas podem conter metais com elevado nível de toxicidade e devem ser classificadas quanto à composição e tamanho para que sejam identificados os riscos e formas de controle de poluição atmosférica (OLIVEIRA, 2014).

A hidrometalurgia é o processo de extração de metais por dissolução do mineral-minério em meio aquoso. É aplicada para a produção de alumina, ouro, urânio, zinco, níquel, cobre, titânio, dentre outros e muito utilizado no Brasil (SOUZA, 2013; SANTOS *et al*, 2006). De acordo com MA *et al* (2020), as instalações de hidrometalurgia de zinco na China, apresentam emissões de partículas suspensas totais e inaláveis acima dos padrões da OMS, para qualidade do ar. O processo de produção de zinco e de tantos outros, é uma das fontes antropogênicas de emissão desse metal que não possui padrão determinado por legislações brasileiras e internacionais, mesmo apresentando risco à saúde humana.

Também foi possível observar a distribuição regional de publicações dos periódicos, que está representada na Figura 10.

Figura 10- Distribuição regional de publicações sobre metais em MP no Brasil.



Fonte: Figura elaborada pela autora com os dados do *Web of Science*.

A Região Sudeste possui a maior representatividade em publicações relacionadas com o tema, com 28 artigos, sendo também a região mais industrializada e mais populosa do Brasil, o que conseqüentemente acarreta a maior magnitude de poluição ambiental advinda dessa região (ALMEIDA, 2004).

No centro de São Paulo, foram observadas tendências decrescentes nas concentrações de material particulado e metais. Tais tendências, entretanto, poderiam não ser observadas em distritos industriais localizados na periferia urbana da cidade. Para avaliar a poluição ambiental em um distrito industrial do sudeste de São Paulo os autores determinaram o teor dos metais Al, Ba, Ca, Cu, Fe, K, Pb, Mg, Mn, Sr e Zn. O preparo de amostra não foi realizado porque a análise foi direta em cascas de árvores utilizando a técnica instrumental de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X. Em suma os autores concluíram, que a população residente neste distrito industrial mais periférico continua recebendo impacto das emissões industriais e móveis da região (LOCOSSELLI *et al*, 2021).

As fases iniciais dos processos de produção secundários, como a preparação da matéria prima, geram poluição do ar, água e solo. A retirada dos bens materiais da natureza para a transformação de produtos finais, impacta o

meio ambiente com o que podemos chamar de poluição industrial. Em virtude do elevado número de indústrias, as regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte e as aglomerações de Campinas, Santos, São José dos Campos, Vitória, Sorocaba, Jundiaí, Guaratinguetá/Aparecida, Barra Mansa/Volta Redonda, Ipatinga/Coronel Fabriciano, Cubatão, Paulínia, Itabira, João Monlevade, Resende, Mariana, Pindamonhangaba e Barroso são exemplos onde a industrialização baseia-se nos mais variados tipos, principalmente a metalurgia, a química e o processamento e extração de minerais (ALMEIDA, 2004).

Com o objetivo de conhecer a principal fonte de metais no material particulado atmosférico, coletou-se na área industrial de Juiz de Fora, Minas Gerais, no período de 2014 a 2016, 22 amostras. As amostras foram extraídas com adição de água régia em micro-ondas e analisadas por espectrometria de absorção atômica. Concluiu-se que os metais Al, Fe, Cr e Mn, possuem origem de fontes naturais, enquanto os metais As, Cu, Cd, Pb e Zn, de origem industrial e veiculares (MIMURA; FERREIRA, SILVA; 2020).

Em uma estação de monitoramento da qualidade na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, foi determinado constituintes inorgânicos no material particulado inalável. A abertura das amostras foi realizada em meio ácido em forno de micro-ondas e as análises realizadas em Espectrômetro de Massas com Fonte de Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS). Os metais identificados foram Al, Ag, As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, U, V e Zn, sendo os teores Al, Ba, Fe e Zn, elevados. Constatou-se que os teores de As, Cr e Ni ultrapassaram os limites determinados pela OMS. Com o auxílio da análise estatística por componentes principais identificou-se as principais fontes desses metais na região, sendo elas a atividade de mineração, indústrias e o tráfego veicular (SANTOS, 2017).

O Estado do Rio de Janeiro recebeu diversas obras para sediar a Copa do Mundo de 2014 e os Jogos Olímpicos de 2016. Com o objetivo de conhecer a influência de tais obras no material particulado fino ($MP_{2,5}$) no estado, realizou-se o monitoramento da presença dos metais Cu, Cd, Pb, Cr, Mn, V, Zn, K, Ti, Ca, Al, Mg e Fe em diversas áreas fluminenses, tanto que possuíam proximidade das obras, quanto não. Comparou-se os resultados obtidos com os

disponibilizados pela rede de monitoramento do Rio de Janeiro. Inferiu-se que as concentrações de Fe foram maiores nas regiões de construções das arenas olímpicas e obras de mobilidade urbana. Contudo, as concentrações dos outros metais não apresentaram relação direta com as obras em questão (VENTURA *et al*, 2017).

Na região nordeste brasileira, em Maracanaú, no estado do Ceará, há uma relevante área industrial, que devido a emissões atmosféricas, necessita de monitoramento da qualidade do ar. No período de 2015 a 2016, Lima *et al* (2020), realizaram coletas de poluentes atmosféricos, incluindo metais associados ao material particulado total (PTS) e inalável (PM₁₀). Os metais (Sb, Cd, Pb, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn) foram extraídos por digestão ácida e determinados por espectroscopia de absorção atômica. O Fe, apresentou concentração de 14,9 µg/m³, mais expressiva entre os metais. Porém a média das concentrações de PM₁₀ apresentou conformidade com os valores estabelecidos pela legislação brasileira e a qualidade do ar foi classificada como boa pelo IQAr.

Na área urbana de Aracajú no estado da Sergipe, analisou-se o teor de Cu e Fe, Mn, Ni, V, Ti por ICP-MS e tratadas estatisticamente por análise multivariada. Identificou-se uma relação direta das concentrações de Cu ao tráfego de veículos, sendo essa a segunda maior fonte de emissão de metais para a atmosfera na região, perdendo apenas para a poeira do solo em suspensão. Porém, aproximadamente 55% das amostras analisadas não apresentaram contaminação por Cu (ALMEIDA *et al*, 2017).

A concentração de Fe, Mn, Cu e Zn em frações de material particulado inalável foi investigada em três diferentes locais da Região de Salvador (Bahia, Brasil): Rodoviária da Lapa, Porto de Aratu e Aldeia Bananeira. A Rodoviária da Lapa, possui impacto por veículos a diesel, o Porto de Aratu é impactado por movimentação de minérios metálicos e centros industriais, enquanto a Aldeia Bananeira está localizada em uma região pouco afetada por veículos, porém próximo ao Porto. O Fe foi o elemento mais encontrado tanto na rodoviária como no porto, sendo as principais fontes rastreadas a ressuspensão do solo por ônibus e o descarte de celeiros sólidos, como fertilizantes e minérios metálicos, o que pode contribuir para riscos à saúde dos trabalhadores locais (PEREIRA *et al*, 2007).

A análise direta de sólidos e espectrometria de absorção atômica eletrotérmica de fonte contínua de alta resolução, é uma alternativa mais econômica de determinação de metais, pois simplifica o manuseio de amostras. Almeida *et al* (2020), utilizou essa técnica para analisar rapidamente amostras de material particulado inalável (MP₁₀) com consumo mínimo de amostra. As determinações de Be, Cd e Pb, foram realizados na cidade de Florianópolis, no estado de Santa Catarina, região Sul do Brasil, onde foram registrados 7 (sete) publicações sobre o mesmo tema, e indicaram a possibilidade da relação da origem dos elementos e impacto das condições meteorológicas na distribuição das partículas sólidas na região.

Altas concentrações de chumbo foram detectadas em precipitações atmosféricas, no período de março de 1998 a fevereiro de 1999, na cidade Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, o que aumenta a probabilidade de também estarem presentes no ar, sendo as regiões mais afetadas as vilas de pescadores (VANZ; MIRLEAN; BAISCH, 2003; MOREIRA; MOREIRA, 2004).

A Região Norte brasileira apresentou apenas 1 artigo publicado sobre metais em material particulado atmosférico. O artigo foi publicado por WU *et al* (2019) e os monitoramentos foram realizados em um local remoto na Floresta Amazônica e um local urbano em Manaus, Amazonas, em 2012. Foram analisados por Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) com sonda eletrônica para microanálise. As partículas que continham metais como Ni, Ti, Zn e Fe, foram mais observados na fração fina nas amostras das duas localidades. O Fe estava associado à amônia e sulfatos, indicando a origem biogênica. Os metais de origem antropogênica (Ni, Ti e Zn) são emitidos pelas ruas ou resultantes de desgaste de freios, tintas de rodovias, construções ou materiais de catalisador de automóveis.

A região Centro-Oeste brasileira, também apresentou 1 artigo publicado relacionado à presença de metais em material particulado na base de dados utilizada na pesquisa. Contudo, Sampaio (2012) realizou a determinação de onze metais em PTS na cidade de Goiânia em sua dissertação, e comparou com os resultados de trabalhos semelhantes em outras cidades do Brasil. As informações estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Concentrações médias de metais associados ao material particulado em algumas cidades brasileiras.

Cidade	Goiânia (GO)	Ouro Preto (MG)	Volta Redonda (RJ)	Rio de Janeiro (RJ)	Piracicaba (SP)	Londrina (PR)
Al (µg/m³)	2,39	32,36	-	5,80	1,42	1,36
Cd (ng/m³)	0,22	-	-	-	-	-
Co (ng/m³)	0,40	-	-	-	-	-
Cr (ng/m³)	4,07	-	-	421,00	24,46	14,23
Cu (ng/m³)	28,72	16,30	160,00	335,00	20,60	14,20
Fe (µg/m³)	2,33	2,80	4,00	38,90	2,85	1,74
Mn (ng/m³)	18,21	113,50	200,00	1216,00	102,40	57,28
Ni (ng/m³)	2,00	47,30	16,00	0,50	6,40	3,50
Pb (ng/m³)	3,49	41,70	224,00	101,00	18,60	12,90
Ti (ng/m³)	33,69	-	-	-	438,30	306,10
Zn (µg/m³)	0,03	30,90	4,00	2,10	0,08	0,03
Fontes	SAMPAIO, 2012	MAGALHÃES, 2005	GIODA, 2004	QUITÉRIO et al, 2004	LOPES, 2003	LOPES, 2003

As variações nas concentrações de poluentes atmosféricos se devem às particularidades locais, tais como: clima, atividades econômicas e a região específica de monitoramento. Os resultados de todas as cidades estão abaixo dos limites máximos apresentados pela norma alemã TA LUFT de 2002.

Nas cidades Volta Redonda e Rio de Janeiro as concentrações de Mn ficaram acima do padrão de partículas inaláveis estabelecidos pela OMS, que é de 120 mg/m³, que podem ser justificadas pela presença de siderúrgicas nas regiões das coletas.

O alumínio e o zinco não possuem limites em legislações nacionais e internacionais, porém o resultado desses metais em Ouro Preto (MG), são cerca de 1000x maiores que dos resultados das demais cidades. De acordo com Magalhães (2005) isso ocorreu devido à presença de uma fábrica de alumínio instalada próximo ao centro urbano da cidade e a presença de zinco na composição química dos filtros de fibra de vidro utilizados na análise.

As cidades de Londrina e Piracicaba apresentaram resultados de Ti relevantes quando comparados ao resultado de Goiânia para esse mesmo metal, também apresentando resultados de partículas inaláveis acima de 120 ng/m³. Em relação à Goiânia, nota-se que as concentrações dos metais analisados foram as menores dentre as cidades comparadas.

Diante do exposto, a alta toxicidade de metais em partículas atmosféricas, principalmente inaláveis, possuem elevada importância na gestão da qualidade do ar e sobre os impactos à saúde pública e ao meio ambiente. As consequências de emissões tóxicas demonstram a necessidade do controle mais efetivo das substâncias emitidas, controle esse, que deve considerar o nível de toxicidade dos componentes, estabelecendo novos limites padrões com monitoramento frequente como estratégia de gestão (MAGALHÃES, 2005).

3.2.4 Preparo de amostras de material particulado atmosférico para determinação de metais

De acordo com a EPA, o método padrão para o tratamento e preparo das amostras de material particulado é o US EPA 3051A, que determina a digestão ácida de sedimentos, lamas e óleos assistida por micro-ondas. O tempo recomendado para a digestão assistida por micro-ondas é de 10 minutos com

10,0 mL de ácido nítrico concentrado para uma massa de cerca de 500 mg de amostra (EPA, 2007).

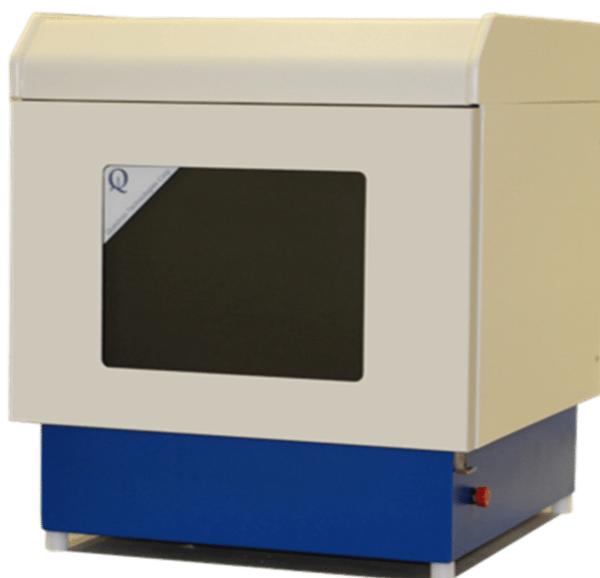
É possível observar alterações nos parâmetros do preparo de amostras de material particulado para a determinação de metais, como o aumento da temperatura de digestão, o aumento do tempo de digestão, a diminuição da proporção da massa de amostra por volume de ácido e a modificação da composição da solução de digestão.

Os métodos de digestão são mais modificados em relação à composição da solução de digestão (ALMEIDA, 2012). O uso da água régia, constituída por ácido clorídrico e ácido nítrico concentrado, na proporção 3:1 (SOUZA *et al*, 2018), é comumente utilizada nas extrações dos metais, porém também é possível encontrar métodos que usem ácido perclórico (DOGORRÀ *et al*, 2007), peróxido de hidrogênio (ALVES *et al*, 2020) e ácido fluorídrico (GODOY; GODOY; ARTAXO, 2005), quando se deseja que ocorra digestão total da amostra.

A eficiência de lixiviação de metais utilizando água régia não é total, porém há estudos que estabelecem que o resultado do seu uso é satisfatório para a detecção de altos teores de metais, como o níquel, chumbo, cromo, cobre e manganês. Os métodos que utilizam o ácido perclórico são criticados, a despeito de sua eficiência, por requererem horas de tratamento e possuir natureza explosiva. As digestões que envolvem o uso do ácido fluorídrico são muito efetivas na dissolução total da amostra, sendo o mais eficiente entre os ácidos inorgânicos na abertura de silicatos, porém há muitos riscos inerentes à sua manipulação o que torna seu uso menos comum (SALDANHA *et al*, 1997).

O forno de micro-ondas, representado na Figura 11, é um equipamento robusto com paredes revestidas de material anticorrosivo e possui sensores de temperatura e pressão, é utilizado em laboratórios para a decomposição de amostras a fim de aumentar a eficiência e tempo de análise do processo quando comparado às condições de temperatura e pressão normais em bancadas laboratoriais. A maior vantagem do seu uso consiste na mínima probabilidade de contaminação cruzada e mínima perdas por volatilização por ser um sistema fechado (SALDANHA *et al*, 1997).

Figura 11- Forno micro-ondas para digestão de amostras.



Fonte: (Astro34, 2021)

Blocos digestores, representados na Figura 12, também são utilizados no preparo de amostras para a extração de metais. Quando comparados aos fornos micro-ondas, possuem maior frequência analítica, menor custo de aplicação e operação. Contudo o seu uso torna o procedimento de determinação mais lenta, considerando que em um sistema aberto é mais difícil controlar as condições de temperatura ideais para que ocorram as reações químicas com máximo rendimento e sem perdas e contaminações cruzadas das amostras (ALMEIDA, 2016).

Figura 12- Bloco digestor.



Fonte: (Loja Net Lab, 2021)

3.2.5 Técnicas analíticas empregadas na determinação de metais em material particulado

As determinações de metais em nível traço em amostras de matrizes ambientais requerem elevada sensibilidade de equipamentos, já que as concentrações dos analitos podem ser encontrados em partes por milhão (ppm), partes por bilhão (ppb) ou até mesmo partes por trilhão (ppt).

As técnicas instrumentais mais citadas dentre os artigos avaliados para a determinação de metais foram a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) a Espectroscopia de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS) e a Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX). A escolha da técnica dependerá da faixa de concentração dos metais, limites de detecção ou seletividade do equipamento, da complexidade da matriz da amostra e da quantidade de elementos para serem determinados (SILVA; CARNEIRO; FERNANDES, 2012; SANTOS, 2017).

A técnica de ICP-MS é comumente utilizada em amostras biológicas e ou ambientais, pois permitem análises com baixos limites de detecção, alta sensibilidade e capacidade multielementar. Nessa técnica as amostras podem ser introduzidas em estado sólido, líquido ou gasoso, porém as amostras líquidas possuem maior facilidade de manipulação por serem homogêneas (BRANDÃO, 2015).

A utilização da técnica do ICP-OES, é uma opção válida para a quantificação de metais em nível traço, pois é sensível, multielementar e seletiva. A detectabilidade da técnica é considerada satisfatória em baixas concentrações e possui elevada exatidão e precisão, visto que as altas temperaturas geradas no processo de atomização/ionização e a atmosfera inerte do gás argônio do plasma diminui as interferências espectrais (SOUZA, 2020).

A fim de determinar vinte elementos (Al, Ca, Cr, Cu, Cd, Fe, Ga, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, Si, Sb, Ti, V e Zn) constituintes das partículas atmosféricas do Rio de Janeiro, sudeste Brasil, no período de 2010 a 2011, utilizou-se as técnicas de ICP-MS e ICP-OES. Ambas foram aplicadas a todos os elementos e, no que se trata ao uso das técnicas, conclui-se que as duas tiveram boa aplicabilidade para a amostra sendo a principal vantagem do ICP-MS sobre o ICP-OES, é o menor limite de detecção por ele alcançado (MATEUS *et al*, 2013).

A FRX também é uma análise multielementar que é baseada na medida de intensidade dos raios X emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitadas. A maior vantagem do seu uso é a aplicabilidade em amostras tanto líquidas, quanto sólidas o que permite a análise direta das amostras. Os principais métodos de excitação são por tubos de raio X, por partículas- PIXE (*Particle Induced X-Ray Emission*), por fontes radioativas e por luz síncrotron (LOPES; APPOLONI; FILHO, 2004).

Um estudo foi realizado, de 2009 a 2011, próximo a um complexo industrial de processamento de minério no estado do Espírito Santo, sudeste, Brasil, a fim de conhecer os principais elementos provenientes dessas atividades e suas principais fontes. Dezenove elementos (Mg, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Pb) foram determinados por Emissão de Raios-X induzida por partículas (PIXE), o que tornou a análise mais rápida e tão abrangente. Conclui-se que dentre os elementos analisados, o Fe, o Al e o Si, foram os mais abundantes e as indústrias de pelotização de ferro e aço foram as principais contribuintes para a emissão de tais metais (SANTOS *et al*, 2017).

3.2.6 Formas de controle de emissão

A fim de reduzir a emissão de poluentes no ambiente industrial há duas opções, monitorar o processo antes dele ocorrer, controlando a temperatura, a qualidade e consumo do combustível e do ar utilizado para a combustão ou usar de equipamentos de controle de poluentes, que são baseados em mecanismos de remoção específicos para àquele processamento. Esses equipamentos também são utilizados em conjunto com o controle das condições de emissão e outros equipamentos, sempre com o objetivo de minimizar o impacto dos poluentes na atmosfera (GUIMARÃES, 2017).

Os mecanismos de remoção de materiais particulados podem ser por impactação, interceptação, difusão, atração eletrostática, gravitação e força centrífuga. No Quadro 6 possui uma breve descrição do fundamento cada um desses mecanismos.

Quadro 6-Mecanismos de controle da emissão de material particulado.

Mecanismo	Diâmetro	Fundamento	Equipamentos
Impactação	>1 μm	A partícula é carregada por um fluxo de gás, até que encontre um alvo. O choque com o alvo, que pode ser uma gota de líquido ou anteparo sólidos, promove a coleta da partícula.	Filtros
Interceptação	0,1 μm - 1 μm	Extensão da impactação. O centro da partícula segue o fluxo contornando o alvo, porém quando o contato acontece, há a remoção da partícula.	Filtros
Difusão	<0,1 μm	Coleta com ajuda do movimento Browniano, onde há impactos entre as moléculas do gás carreador com as partículas presentes no próprio gás, fazendo com que elas se desviem da trajetória e sejam coletadas.	Filtros
Atração eletrostática	<10 μm	Partículas submetidas a um campo elétrico capaz de serem movidas até uma superfície de carga oposta, onde serão carregadas e atraídas.	Precipitador eletrostático
Gravidade	>40 μm	É utilizado em partículas pesadas, já que a força da gravidade atua sobre a partícula e elas se depositam em uma superfície coletora.	Câmara de poeira
Força centrífuga	>2,5 μm	Consiste em um gás carreador em alta velocidade e que, quando entra tangencialmente à parede de um tubo circular, adquire uma trajetória circular, porém as partículas sólidas presentes no gás tendem a permanecer a trajetória tangente à curva colidindo com o anteparo do tubo. Quando o processo finaliza, as partículas, que foram mantidas na parede do tubo, se desprendem são coletadas.	Ciclones

Fonte: GUIMARÃES, 2017

Os filtros são equipamentos porosos que coletam o material particulado através da passagem de um fluxo de gás que os carrega. São economicamente vantajosos e muito efetivos, podendo coletar com sucesso partículas de 0,1 μm

e remover substancialmente partículas de 0,01 μm . Os filtros mais utilizados no mundo são os filtros em painéis, em tecidos, de fibra de vidro, de carvão ativado, e de tecido de arame de aço. Para a escolha de tecidos filtrantes devem ser consideradas a temperatura de operação, a resistência ácida, básica e à abrasão do tecido. À medida que um filtro é utilizado, há um aumento da eficiência do mesmo, pois a cada filtração ocorre a formação de uma camada de partículas que diminui o tamanho dos poros do tecido, porém possuem o processo de limpeza dificultado (GUIMARÃES, 2017). Os filtros de mangas, representados na Figura 13, possuem elevada eficiência e são utilizados em grande escala em indústrias de fundição, no Brasil, que é um dos dez maiores mercados de fundição do mundo (TEIXEIRA; CERON, 2020).

Figura 13- Filtro de Mangas



Fonte: (WEG, 2021).

O precipitador eletrostático, Figura 14, carrega eletricamente as partículas a serem carregadas pelo gás carreador e em seguida submete o fluxo a um campo elétrico, capaz de desviar as partículas da trajetória, coletando-as. Dois fatores afetam a eficiência do equipamento, sendo eles a uniformidade do fluxo de gás e a resistividade da partícula. Se as partículas a serem removidas, apresentam baixa resistividade, ou seja, adquirem e perdem cargas facilmente, logo o caminho delas em direção ao eletrodo da coleta não é garantido e ela

pode diminuir a eficiência do processo de separação. Em geral as vantagens do seu uso são extensas, possuem elevada eficiência, baixo custo operacional, resistente às altas temperaturas, pressões e vácuo e possuem a vida útil muito longa. Já as desvantagens são, alto custo de implementação, espaço utilizado, ser extremamente sensível a mudanças no fluxo de gás e liberação de gás ozônio para a atmosfera durante a ionização do gás (GUIMARÃES, 2017). Os precipitadores eletrostáticos são amplamente utilizados no tratamento de gases de caldeiras que geram calor a partir da combustão de carvão mineral, devido à baixa resistividade do carvão (OZAWA, 2003).

Figura 14- Precipitador Eletrostático.



Fonte: (MAE, 2021).

A câmara de poeira, ou sedimentador, representado na Figura 15, é o equipamento que possui o mecanismo mais simples, o da força gravitacional. São câmaras que recebem o gás contendo as partículas, que vão expandindo a caixa, diminuindo a velocidade do gás e aumentando seu tempo de residência dentro da câmara, e conseqüentemente oportunizando a sedimentação das partículas pesadas. Quanto menor a partícula a ser removida, maior deverá ser o tamanho da câmara e o tempo de residência das partículas na mesma. As vantagens da utilização desse equipamento é a simplicidade, baixo custo e fácil manutenção, enquanto as desvantagens são o espaço que o equipamento ocupa e a baixa eficiência para partículas menores que 40 μm (GUIMARÃES, 2017). A aplicação de câmaras de poeira é ampla no ramo agrícola para limpeza

de cereais provenientes das lavouras. Esse processo industrial favorece a armazenagem e comercialização dos grãos (DUPONT, 2013).

Figura 15- Câmara de Poeira.



Fonte: (MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS, 2021).

Os ciclones, representado na Figura 16, são equipamentos de baixo custo que separam o material particulado de uma corrente de gás com elevada eficiência. Sua estrutura é constituída de uma parte cilíndrica e outra cônica, em que a força centrífuga é a responsável pela separação. O aumento da eficiência do ciclone é diretamente proporcional ao aumento do diâmetro da partícula, da densidade da partícula, da velocidade de entrada do gás carreador, do comprimento do ciclone, do número de revoluções da corrente de gás dentro do equipamento e da concentração das partículas na entrada e da superfície interna da parede do ciclone. As vantagens do uso desse equipamento são a alta eficiência, a resistência a altas temperaturas e quedas de pressão, a baixa perda de carga. Contudo, não são eficientes para a coleta de partículas pegajosas e quebradiças (GUIMARÃES, 2017). O beneficiamento da madeira em serrarias e madeireiras gera grande concentração de material particulado do ar, os ciclones são boas opções para a remoção dessas partículas, sendo que são equipamentos eficientes para partículas maiores (MALDANER, 2012).

Figura 16- Ciclone.



Fonte: (JY, 2021).

Os lavadores de gases, representados na Figura 17, são coletores úmidos utilizados para controle de materiais particulados, gases e vapores. São equipamentos simples de construir, mas a operação deve ser bem conhecida para evitar perdas financeiras e baixa eficiência de coleta. O líquido de lavagem mais utilizado é a água, no processo, as partículas são transferidas da corrente gasosa para o líquido de lavagem via mecanismos de impactação inercial, deposição gravitacional, interceptação e difusão browniana. São mais utilizados por indústrias para remover partículas coesivas, corrosivas e partículas explosivas e sua maior vantagem está na remoção eficaz numa ampla faixa granulométrica, incluindo as partículas inaláveis acoplado com o baixo custo operacional (MEILI, 2006).

Figura 17- Lavador de Gases.



Fonte: (MICHELON, 2021).

A escolha do método de controle para a redução da poluição na fonte deve ser direcionada pela avaliação do processo industrial em questão, levando em consideração a vazão requerida, a temperatura de saída, a granulometria do material particulado, e os outros componentes do efluente gasoso. Após o estudo da viabilidade técnica da implementação do equipamento, deve ser analisado a factibilidade econômica de sua implementação, que inclui a aquisição, instalação, operação e manutenção. Isto é, não há como definir um equipamento que seja melhor para todos os tipos de processo (FERNANDES, 2003).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O nível da qualidade do ar é determinado pela concentração e dispersão eficaz de poluentes emitidos por fontes antropogênicas ou naturais. Concentrações de metais em material particulado inalável aumentam os riscos para a saúde e bem estar da população e preservação do meio ambiente.

Diante disso, infere-se a importância da determinação da composição elementar do material particulado atmosférico e a necessidade de monitorá-lo por meio de legislações, visto que somente treze atividades estão padronizadas pela DN COPAM nº 436 de 2011, e são aplicadas apenas às fontes fixas, e não há legislação que contemple as emissões por fontes móveis, que possuem impactos tanto quanto elevados, principalmente em grandes centros urbanos. Contudo, mesmo a legislação já existente, não dispõe de padrões segmentados quanto à composição elementar dessas emissões. Tal fato mascara o real efeito da qualidade do ar monitorado e dificulta o estabelecimento da relação dos verdadeiros impactos com as emissões atmosféricas.

De acordo com o levantamento das publicações brasileiras relacionadas ao tema, considera-se o interesse pelo assunto ainda baixo quando comparado aos dados globais, mesmo apresentando crescimento a partir de 2014. A Região Sudeste apresentou a maior representatividade em artigos publicados, o que já era esperado por ser a região mais poluidora do Brasil, bem como também a mais desenvolvida. Além disso, foi possível identificar os dez metais mais analisados, que em ordem crescente são Cu, Zn, Pb, Fe, Mn, Ni, Al, K, Cd e Cr. A principal estratégia de preparo de amostra de material particulado foi a extração ácida assistida por micro-ondas ou por bloco digestor. E as principais técnicas analíticas utilizadas foram a Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS), a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) e a Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX).

Ao consultar as pesquisas realizadas no Brasil, é possível identificar as principais possíveis fontes propagadoras de material particulado com metais em sua composição, o que torna mais viável a proposição de estratégias para o controle da poluição. As principais origens são antropogênicas e ressaltam as atividades industriais, as emissões veiculares, a ressuspensão do solo por

construções ou poeiras sedimentadas. As aplicações de equipamentos adequados no controle das emissões de materiais particulados são estratégias eficazes na gestão da poluição do ar, pois são capazes de reter os poluentes antes de suas emissões e, posteriormente, se possível, propiciar ao material recolhido a destinação adequada, incluindo o uso do resíduo em outro processo.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

Como perspectivas futuras para esse trabalho, sugere-se:

- Realizar um levantamento de dados e tratamento estatístico capaz de mostrar correlação da emissão dos principais metais presentes no ar com suas respectivas origens.
- Realizar um levantamento das concentrações médias dos constituintes metálicos encontrados no material particulado atmosférico no Brasil.
- Conhecer a influência da presença de metais em material particulado no meio ambiente, como em plantas, solo e água, a partir do transporte dos elementos pelo ar.
- Ampliar as pesquisas sobre os materiais publicados para os poluentes orgânicos atmosféricos no Brasil e seus impactos na saúde humana.
- Fomentar a discussão da composição de materiais particulados na atmosfera e sua importância para o bem-estar da população em políticas públicas e institucionais.
- Propor a implementação de legislações brasileiras que preveem padrões de emissão para cada elemento tóxico presente na atmosfera, a partir dos levantamentos de dados realizados.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, I. T. A **Poluição Atmosférica por Material Particulado na Mineração a Céu Aberto**. 1999. 194 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.
- ALMEIDA, L. S. de. **Avaliação de diferentes procedimentos de preparo de amostra- estudos com micro-ondas, radiação UV e mineralização por via úmida na determinação simultânea de Zn, Cd, Pb e Cu em macroalga por voltametria**. 2016. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química Tecnológica e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2016.
- ALMEIDA, R. S. de. A Industrialização E A Questão Ambiental Na Região Sudeste Do Brasil. **Caminhos de Geografia**, S.I, v. 11, n. 4, p. 53-66, fev. 2004.
- ALMEIDA, T. S., SANT'ANA, M. O., CRUZ, J. M., TORMEN, L., BASCUÑAN, V. L. A. F., AZEVEDO, P. A., ARAUJO, R. G. O. Characterisation and source identification of the total airborne particulate matter collected in an urban area of Aracaju, Northeast, Brazil. **Environmental Pollution**, Aracaju, v.226, p.444–451, jul. 2017.
- ALMEIDA, T. S.; BRANCHER, M.; LISBOA, H. de M.; FRANCO, D.; MARANHÃO, T. A.; BORGES, D. L.G. Direct analysis of particulate matter (PM10) for the determination of Be, Cd and Pb using high resolution-continuum source electrothermal atomic absorption spectrometry: assessment of the potential correlation between analyte content and meteorological parameters. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, Santa Catarina, v. 172, p. 105951-105960, out. 2020.
- ALVES, C. Aerossóis Atmosféricos: Perspectiva Histórica, Fontes, Processos Químicos De Formação E Composição Orgânica. **Química Nova**, Viana do Castelo, v. 28, n. 5, p. 859-870, abr. 2005.
- ALVES, N. de O.; PEREIRA, G. M.; DOMENICO, M. di; COSTANZO, G.; BENEVENUTO, S.; FONOFF, A. M. de O.; COSTA, N. de S. X.; JÚNIOR, G. R.; KAJITANI, G. S.; MORENO, N. C. Inflammation response, oxidative stress and DNA damage caused by urban air pollution exposure increase in the lack of DNA repair XPC protein. **Environment International**, São Paulo, v. 145, p. 106150-106164, dez. 2020.
- ANDRADE, M. F.; KUMAR, P.; FREITAS, E. D.; YNOUE, R. Y.; MARTINS, J.; MARTINS, L. D.; NOGUEIRA, T.; PEREZ-MARTINEZ, P.; MIRANDA, R. M.; ALBUQUERQUE, T.; GONÇALVES, F. L. T.; OYAMA, B.; ZHANG, Y. Air quality in themegacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, São Paulo, v. 159, p. 66-82, 2017.
- ASTDR, Agency For Toxic Substances And Disease Registry. **A-Z Index**. 2021. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/az/n.html>. Acesso 10 fev. 2021.
- ASTRO34. Forno de Micro-ondas para digestão de amostra. Disponível em: <http://astro34.com.br/tecnologias/preparacao-de-amostra/sistema-de-digestao-por-micro-ondas/forno-de-micro-ondas-para-digestao-de-amostras-questron-technologies-modelo-qlab-pro/>. Acesso em 07 mar. 2021.
- BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844 p.
- BARBON, A.; GOMES, J. Simulação das Emissões Atmosféricas Sobre o Município de Araucária com Uso do Modelo AERMOD. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 129-140, 2010.
- BEAL, A.; BUFATO, C. A.; ALMEIDA, D. S. de; SQUIZZATO, R.; ZEMIANI, A.; VERNILO, N.; BATISTA, Carla E.; SALVADOR, G.; BORGES, D. L.G.; SOLCI, M. C. Inorganic Chemical Composition of Fine Particulates in Medium-Sized Urban Areas: a case study of brazilian

cities. **Aerosol And Air Quality Research**, Londrina, v. 17, n. 4, p. 920-932, 2017. Taiwan Association for Aerosol Research.

BELO, P. I. D.; TOFOLI, R. **Quantificação Dos Níveis De Partículas Finas (Mp2,5) No Município De Vitória**. 2011. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011. D

BRAGA, A. L. F.; PEREIRA, L. A. A.; PROCÓPIO, M.; ANDRÉ, P. A.; SALDIVA, P. H. N. Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 570-578, 2007.

BRANDÃO, P. A. A. **Determinação de estanho em tecidos de ratas por ICP-MS**. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química Analítica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

BRITO, G. F. S.; SODRÉ, F. F.; ALMEIDA, F. V. O impacto do material particulado na qualidade do ar. **Revista Virtual de Química**, Brasília, v. 5, n. 10, p. 1-20, out. 2018. Disponível em: <https://www.ufjf.br/baccan/files/2019/04/Brito-Gabriel-RVQ-NoPrelo.pdf>. Acesso 01 fev. 2021.

BRITO, P. H. F.; ARAÚJO, R. S.; SILVA, G. M. Composição Química do Material Particulado Atmosférico: uma revisão de literatura. **HOLOS**, Rio Grande do Norte, v. 34, n. 4, p. 62-74, 2018.

CAMARA, V. F.; LISBOA, H. M.; HOINASKI, L.; DAVID, P.C. Levantamento das emissões atmosféricas da indústria da cerâmica vermelha no sul do estado de Santa Catarina, Brasil. **Cerâmica**, Santa Catarina, v. 61, n. 358, p. 213-218, 2015.

CAPANEMA, J. C. **Fábrica de cimento Itaú e ao fundo a Cidade Industrial – 1970**. 2018. Disponível em: <http://www.contagemnotempo.com.br/fabrica-de-cimento-itaue-ao-fundo-cidade-industrial-1970/>. Acesso 01 fev. 2021.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (São Paulo) (org.). **Qualidade do ar: poluentes**. Poluentes. 2021. CETESB. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 10 jan. 2021

DE NEVERS, N. *Air Pollution Control Engineering*. New York: Mc Graw Hill, 1995. 506 p.

DERISIO, J. C. *Introdução ao controle de poluição ambiental*. 2. ed. São Paulo: Signus, 2004. 164 p.

DONGARRÀ, G.; MANNO, E.; VARRICA, D.; VULTAGGIO, M. Mass levels, crustal component and trace elements in PM10 in Palermo, Italy. **Atmospheric Environment**, Palermo, v. 41, n. 36, p. 7977-7986, nov. 2007.

DUPONT, F. **Análise E Dimensionamento De Câmaras De Aspiração Em Máquinas De Limpeza De Cereais**. 2013. 59 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Industrial, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

ENERGÉTICA. **Agv Mp10 Amostrador De Grande Volume**. 2015. Disponível em: https://www.energetica.ind.br/wp-content/uploads/2015/12/agv_mp10.pdf. Acesso 09 fev. 2021.

EPA- United States Environmental Protection Agency. **2017 Emissions Modeling Platform**. 2017b.

EPA- United States Environmental Protection Agency. **Air Quality Dispersion Modeling**. 2020.

EPA-- United States Environmental Protection Agency. **Particulate Matter (PM) Basics**. 2021.

EPA- United States Environmental Protection Agency. **AERMOD Implementation Guide**. Carolina do Norte, p. 39. 2018.

EPA- United States Environmental Protection Agency. **Revisions to the Guideline on Air Quality Models: Enhancements to the AERMOD Dispersion Modeling System and Incorporation of Approaches To Address Ozone and Fine Particulate Matter**. 2017a.

EPA- United States Environmental Protection Agency. **User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)**. Carolina do Norte, p. 333. 2016.

EPA- United States Environmental Protection Agency. **User's Guide for Draft AERSURFACE Tool (Version 19039_DRFT)**. 2019.

EPA- United States Environmental Protection Agency. **Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils**. Revision 1. Washington, DC. 2007.

EXCELÊNCIA AMBIENTAL. **Amostragem de partículas inaláveis (d. 2021**. Disponível em: <https://excelenciaambiental.com.br/monitoramento-da-qualidade-do-ar/amostragem-de-particulas-inalaveis-10um/>. Acesso 01 fev. 2021.

FAJERSZTAJN, L.; VERAS, M.; BARROZO, L. V.; SALDIVA, P. Air pollution: a potentially modifiable risk factor for lung cancer. **Nature Reviews Cancer**, São Paulo, v. 13, n. 9, p. 674-678, 2013.

FEAM- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (Minas Gerais). **Qualidade do ar**. Disponível em: <http://www.feam.br/qualidade-do-ar/qualidade-do-ar>. Acesso em: 15 jan. 2021.

FEAM- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (Minas Gerais). **Metodologia para estimativa dos impactos ambientais associados ao tráfego veicular urbano**. Belo Horizonte, p. 27. 2015.

FEAM- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (Minas Gerais). **Orientações Técnicas Para A Elaboração De Um Estudo De Dispersão Atmosférica**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte, p. 10. 2019.

FERNANDES, P. S. Gestão de Fontes Estacionárias de Poluição Atmosférica. *In: Emissões Atmosféricas*. UFPR, 2003. Cap. 3, p. 181-286.

FONTENELLE, A. L. P. **Geração eólica urbana e segurança energética: uso de dados de reanálise atmosférica para avaliação do potencial preliminar**. 2019. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

FRONTERAA, A.; CIANFANELIA, L.; VLACHOSB, K.; LANDONIA, G.; CREMONAA, G. Severe air pollution links to higher mortality in COVID-19 patients: The “double-hit” hypothesis. **Journal Of Infection**, Milão, v. 81, p. 255-259, 2020.

GIODA, A.; SALESC, J. A.; CAVALCANTI, P. M. S.; MAIAC, M. F.; MAIAD, L. F. P. G.; AQUINO NETO, F. R. J. Evaluation of Air Quality in Volta Redonda, the Main Metallurgical Industrial City in Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Rio de Janeiro, vol. 15, n. 6, 856-864, 2004.

GODOY, Maria Luiza D.P.; GODOY, José Marcus; ARTAXO, Paulo. Aerosol source apportionment around a large coal fired power plant—Thermoelectric Complex Jorge Lacerda, Santa Catarina, Brazil. **Atmospheric Environment**, Santa Catarina, v. 39, n. 29, p. 5307-5324, set. 2005.

GONZAGA, A. C.; FREITAS, A. C. V. Analysis of the relationship between weather conditions, air pollution and viral respiratory infections: the COVID-19 case. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e591985942, 2020.

GUERRA, T. **Estudo Sobre a Turbulência na camada Limite Planetária**. 2008. 76 f. Monografia (Bacharel em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

GUIMARÃES, C. de S. **Controle e Monitoramento de Poluentes Atmosféricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 238 p.

STATE OF GLOBAL AIR 2020. Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute. 2020. Disponível em: <https://www.stateofglobalair.org/>. Acesso 05 jan. 2021.

HOINASKI, L. **Avaliação de métodos de identificação de fontes emissoras de material particulado inalável (MP₁₀)**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. 135 p. 2010.

IBAMA- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (Brasília) (org.). **PRONAR – Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar**. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/urbano/programas_e_projetos/pronar_-_programa_nacional_de_controle_de_qualidade_do_ar.html. Acesso 05 jan. 2021.

JY. Ciclones. Disponível em: <http://pt.dustcontrolling.com/cyclone-dust-collector/>. Acesso em 21 mar. 2021.

KELLER LUFTTECHNIK (Alemanha). **The emission limits of the “TA-Luft”**. 2020. Disponível em: https://keller-lufttechnik.de/fileadmin/user_upload/6_infocenter/broschueren/5_vorschriften/ta-luft_072017_eng.pdf. Acesso 01 fev. 2021.

LACAVA, C. I. V. Avaliação da qualidade do ar. **Emissões Atmosféricas**. Santa Catarina: Ufsc, 2003. Cap. 2. p. 131-180. Disponível em: http://www.ambiental.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2014/08/Livro_TGA-EA-_cap_2__QUAL_AR.pdf. Acesso 07 fev. 2021.

LEITE, L.; RODRÍGUEZ, J. M.; DOURADO, L.; SOARES, F.; ALMEIDA, S. Chuva e Chuva Ácida: Um Estudo Comparativo das Concepções de Estudantes Minhotos e Galegos. **Researchgate**. Braga, p. 1-13. 2010.

LENZI, E.; FAVERO, L. B. **Introdução à Química da Atmosfera - Ciência, Vida e Sobrevivência**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019. 480 p.

LIMA, J. R.; SALGADO, B. C. B.; CAVALCANTE, F. S. Á.; OLIVEIRA, M. L. M.; ARAÚJO, R. S. Avaliação da poluição atmosférica na área do distrito industrial de Maracanaú (CE), Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Maracanaú, v. 25, n. 3, p. 521-530, jun. 2020.

LISBOA, H. M.; KAWANO, M. Monitoramento De Poluentes Atmosféricos. In: LISBOA, H. M.; KAWANO, M. **Controle Da Poluição Atmosférica**. 7. ed. Montreal: Si, 2007. p. 2-70.

LIU, F.; WANG, M.; ZHENG, M. Effects of COVID-19 lockdown on global air quality and health. **Science Of The Total Environment**, Jiangsu, v. 755, p. 142533-142547, 2020.

LOCOSSELLI, G. M.; LOPESMOREIRA, T. C.; CHACÓN-MADRIDD, K.; ARRUDAD, M. A. Z.; CAMARGO, E. P. de; KAMIGAUTIE, L. Y.; TRINDADE, R. I. F. da; ANDRADE, M. de F.; ANDRÉ, C. D. S. de; ANDRÉ, P. A. de. Spatial-temporal variability of metal pollution across an industrial district, evidencing the environmental inequality in São Paulo. **Environmental Pollution**, São Paulo, v. 263, p. 114583-114591, ago. 2020.

LOJA NET LAB. Bloco digestor digital. Disponível em: <https://www.lojanetlab.com.br/equipamentos-para-laboratorios/bloco-digestor/bloco-microdigestor-de-kjeldahl-microprocessado-q327m>. Acesso em 07 mar. 2021.

LOPES, F. **Caracterização química do material particulado suspenso na atmosfera empregando a fluorescência de raios X dispersiva em energia (EDXRF)**. 2003. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

LOPES, F.; APPOLONI, C. R.; NASCIMENTO FILHO, V. F. do. Caracterização Química Do Material Particulado Suspenso Na Atmosfera De Londrina Empregando A Fluorescência De Raios X Dispersiva Em Energia (Edxrf). **Lfnatec - Publicação Técnica do Laboratório de Física Nuclear Aplicada**, Londrina, v. 8, n. 2, p. 1-57, jul. 2004.

MA, Z.; DUAN, L.; JIANG, J.; DENG, J.; XU, F.; JIANG, L.; LI, J.; WANG, G.; HUANG, X.; YE, W. Characteristics and threats of particulate matter from zinc electrolysis manufacturing facilities. **Journal Of Cleaner Production**, Beijing, v. 259, p. 120874-120950, 2020.

MALDANER, Leonardo Hammer. **Uso de Ciclones para coleta de material particulado gerado no beneficiamento de madeira**. 2012. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS. Câmara de Poeira. Disponível em: <https://www.manutencaoesusprimentos.com.br/vantagens-dos-coletores-de-poeira/#gsc.tab=0>. Acesso em 21 mar. 2021.

MARCON, J. B. **Desenvolvimento De Procedimentos Para Subsidiar As Exigências Legais De Fiscalização E Licenciamento Ambiental Com Enfoque Na Poluição Atmosférica**. 2013. 183 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013.

MEILI, L. **Estudo do desempenho de lavadores de gases do tipo Venturi com Seção Circular**. 2006. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

MENDONÇA, R. B. e S. **Estudos De Espécies Metálicas Associadas Ao Mp10 E Mp2,5 Oriundos De Emissões Veiculares**. 2013. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Univeridade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

MIMURA, A. M. S.; F., C. C. M.; SILVA, J. C. J.. Evaluation of atmospheric particulate matter from an industrial area in Southeast Brazil. **Environmental Monitoring And Assessment**, Juiz de Fora, v. 192, n. 12, p. 192-204, 17 nov. 2020.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Copam nº 187**. Minas Gerais, Belo Horizonte, 19 set. 2013. Disponível em <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=258656>. Acesso em 10 jan. 2021.

MICHELON. Lavadores de Gases. Disponível em: <https://www.michelon.ind.br/produtos/es/1/lavador-de-gases>. Acesso em 05 abr. 2021.

MMA. Resolução CONAMA Nº 03/1990 - Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Brasília, p. 15937-15939. 1990.

MMA. Resolução CONAMA Nº 316/2002 - Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Brasília, 2002.

MMA. Resolução CONAMA Nº 382/2006 - Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Brasília, 2006.

MMA. Resolução CONAMA Nº 386/2006 - Altera o art. 18 da Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Brasília, 2006.

MMA. Resolução CONAMA Nº 436/2011 - Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Brasília, 2011.

MMA. Resolução CONAMA Nº 491/2018 - Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Brasília, p. 155-156. 2018.

MMA. Resolução CONAMA Nº 499/2020 - Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Brasília. 2020.

MOREIRA, F. R.; MOREIRA, J. C. A cinética do chumbo no organismo humano e sua importância para a saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 167-181, 2004.

NETO, C. M. S.; CARNEIRO, V. A.; SILVA, F. S.; PEREIRA, L. S.; GONÇALVES, B. B. Emissões Atmosféricas por Chaminés Industriais nas Mesorregiões Leste, Centro e Sul do Estado de Goiás (Brasil). **Revista Mirante**, Anápolis, v. 8, n. 1, p. 169-184, 2015.

OLIVEIRA, A. A. B. **Inventário Das Emissões Atmosféricas Na Indústria Siderúrgica**. 2014. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

OLIVEIRA, N. R. de. **Composição Inorgânica Do Material Particulado Inalável (PM10) Da Região Metropolitana De Belo Horizonte**. 2017. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Tecnológica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

OZAWA, M. **Determinação experimental da resistividade ôhmica de cinzas volantes para projeto de precipitados eletrostáticos**. 2003. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PATRA, S. S.; PANDA, S.; DAS, T.; RAMASAMY, B. COVID-19 Fatality: statistical evidence to engender the need for focal shift from air pollutants to multi-dimensional intervention. **Aerosol And Air Quality Research**, Bhubaneswar, v. 21, n. 1, p. 200410-200417, 2020.

PEDROSO, A. N. V. Poluentes Atmosféricos & Plantas Bioindicadoras. 2007.

PEREIRA, P. A. de P.; LOPES, W.A.; CARVALHO, L. S.; ROCHA, G. O. da; BAHIA, N. de C.; LOYOLA, J.; QUITERIO, S. L.; ESCALEIRA, V.; ARBILLA, G.; ANDRADE, J. B. de. Atmospheric concentrations and dry deposition fluxes of particulate trace metals in Salvador, Bahia, Brazil. **Atmospheric Environment**, Salvador, v. 41, n. 36, p. 7837-7850, nov. 2007.

PORTAL DE PERIÓDICOS. Disponível em: <http://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php?>. Acesso 04 fev. 2021.

POZZA, S. A. **Identificação das Fontes de Poluição Atmosférica na Cidade de São Carlos-SP**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2005.

QUITERIO, S. L.; SILVA, C. R. S.; ARBILLA, G.; ESCALEIRA, V. Metals in airborne particulate matter in the industrial district of Santa Cruz, Rio de Janeiro, in an annual period. **Atmospheric Environment**, Rio de Janeiro, v. 38, n. 2, p. 321-331, jan. 2004.

REDÓN, A. B.; SAPIÑA, C. B.; AROCA, A. S. Changes in air pollution during COVID-19 lockdown in Spain: A multi-city study. **Journal Of Environmental Sciences**, Valência, v. 101, p. 16-26, mar. 2020.

RIBEIRO, M. V.; FERREIRA, T. K. A.; SANTOS, J. D. dos. Modelagem Da Dispersão De Poluentes Atmosféricos Para Avaliação Da Qualidade Do Ar Em São José Da Lapa/Mg. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 258-276, 1 jul. 2019.

ROMÃO, R.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N.; PINHEIRO, P. M.; BRAGA, A. L. F.; MARTINS, L. C. The relationship between low birth weight and exposure to inhalable particulate matter. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 6, p. 1101-1108, jun. 2013.

SALDANHA M. F. C.; PERÉZ, D. V.; MENEGUELLI, N. do A. MOREIRA, J. da C.; VAITSMAN, D. S. CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1997, Águas de Lindóia. **Avaliação De Cinco Tipos De Abertura Para Determinação Dos Teores De Ferro, Manganês E Zinco Em Alguns Solos Brasileiros**. Pesq. And. Cnps. 10 p. 1997.

SAMPAIO, F. E. **Metais Associados Ao Material Particulado Na Região Central Da Cidade De Goiânia E Os Possíveis Agravos À Saúde Da População**. 2012. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Ambientais e Saúde, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2012.

SANTIAGO, A. **Material Particulado Total Suspenso Na Baixa Atmosfera Em Cuiabá-Mt No Período De Queimadas**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Edificações e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

SANTOS, J. M.; REIS, N.I C.; GALVÃO, E. S.; SILVEIRA, A.; GOULART, E. V.; LIMA, A.T.. Source apportionment of settleable particles in an impacted urban and industrialized region in Brazil. **Environmental Science And Pollution Research**, Vitória, v. 24, n. 27, p. 22026-22039, 7 ago. 2017.

SANTOS, R. L.; NASCIMENTO, M.; RIZZO, A. C.; CUNHA, C. D. Tecnologia Mineral: metalurgia extrativa. **Recursos Minerais no Brasil problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Cetem. p. 265-271. 2016.

SANTOS, S. R. A. **Determinação De Constituintes Inorgânicos Em Material Particulado Inalável Por Espectrometria De Massas Com Fonte De Plasma Acoplado Indutivamente**. 2017. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Química Tecnológica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SANTOS, U. P. Poluição, aquecimento global e repercussões na saúde. **Revista da Associação Médica Brasileira**, v. 53, n. 3, p. 193-194, 2007.

SÃO PAULO. CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Padrões de Qualidade do Ar**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 18 fev. 2021.

SEINFELD. J. H. Contaminacion atmosferica: Fundamentos Físicos y Químicos. Mcgraw-Hill, Madrid- Espanha, 1995.

SILVA, F. M.; CHAVES, M. S.; LIMA, Z. M. C. **Atmosfera terrestre: geografia física II**. Natal: Ufrn - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 240 p. 2009.

SILVA, G. F. da. **Determinação Multielementar Por Icp-Ms Em Material Particulado (PM10) Coletado Em Área Urbana De Belo Horizonte**. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

SILVA, L. I. D.; CARNEIRO, M. C.; FERNANDES, T. L. A. P. Química analítica aplicada ao estudo do chumbo, Santo Amaro -BA. In: **Projeto Santo Amaro - BA, aglutinando ideias, construindo soluções: diagnóstico**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. Cap.13, p.174-190. 2012.

SOUZA, A. F. E. **Caracterização De Material Particulado Atmosférico Na Cidade De Limeira - Sp**. 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2015.

SOUZA, I. da C.; ARRIVABENE, H. P.; CRAIG, C.-A.; MIDWOOD, A. J.; THORNTON, B.; MATSUMOTO, S. T.; ELLIOTT, M.; WUNDERLIN, D. A.; MONFERRÁN, M. V.; FERNANDES, M. N. Interrogating pollution sources in a mangrove food web using multiple stable isotopes. **Science Of The Total Environment**, Vitória, v. 640-641, p. 501-511, nov. 2018.

SOUZA, J. I. **Mineração – Introdução a Hidrometalurgia**. Ceará: Governo do Estado do Ceará-Secretaria da Educação, 2013.

TEIXEIRA, M. Z.; CERON, L. P. Estudo de aplicação em filtro de mangas na indústria de fundição. **Meio Filtrante: Filtração do Ar**, Porto Alegre, v. 18, p. 40-48, jan. 2020.

TELES, D. B. **Projeto e validação de válvula industrial do tipo esfera para baixa emissão fugitiva**. 2015. 92 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

TRAVAGLIO, M.; YU, Y.; POPOVIC, R.; SELLEY, L.; LEAL, N. S.; MARTINS, L. M. Links between air pollution and COVID-19 in England. **Environmental Pollution**, Cambridge, v. 268, p. 115859-115869, 2020.

TRINDADE, B. T. **Quantificação dos Aerossóis Atmosféricos e a Influência dos Principais Sistemas Meteorológicos Atuantes na Região da Grande Vitória/ES: Um Estudo de Caso Para o Inverno de 2013**. 2013. 90 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2013.

VANZ, A.; MIRLEAN, N.; BAISCH, P. Avaliação de poluição do ar por chumbo particulado: uma abordagem geoquímica. **Química Nova**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 25-29, jan. 2003.

VENTURA, L. M. B.; MATEUS, V. L.; ALMEIDA, A. C. S. L. de; WANDERLEY, K. B.; TAIRA, F. T.; SAINT'PIERRE, T. D.; GIODA, A. Chemical composition of fine particles (PM_{2.5}): water-soluble organic fraction and trace metals. **Air Quality, Atmosphere & Health**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 7, p. 845-852, 13 abr. 2017.

WEG. Filtro de mangas. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/industrial-applications/baghouses>. Acesso em 21 mar. 2021.

WU, L.; LI, X.; KIM, H. K.; GENG, H.; GODOI, R. H. M.; BARBOSA, C.G. G.; GODOI, A.F. L.; YAMAMOTO, C. I.; SOUZA, R. A. F. de; PÖHLKER, C. Single-particle characterization of aerosols collected at a remote site in the Amazonian rainforest and an urban site in Manaus, Brazil. **Atmospheric Chemistry And Physics**, Manaus, v. 19, n. 2, p. 1221-1240, 15 out. 2018.

WU, X.; NETHERY R.C.; SABATH M.B.; BRAUN D.; DOMINICI F. Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. **Science Advances**, Boston, v. 6, n. 4049, p. 1-6, nov. 2020.

ZHANG, K.; CHAI, F.; ZHENG, Z.; YANG, Q.; LI, J.; WANG, J. ZHANG, Y. Characteristics of atmospheric particles and heavy metals in winter in Chang-Zhu-Tan city clusters, China. **Journal of Environmental Sciences**. Vol. 26, p. 147–153, 2014.