



**SUÉLEM MONTES SALES**

**AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DO FLUORETO EM INDÚSTRIA DE  
FERTILIZANTES NA MESORREGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO  
PARANAÍBA - MINAS GERAIS**

**LAVRAS – MG**

**2021**



**SUÉLEM MONTES SALES**

**AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DO FLUORETO EM INDÚSTRIA DE  
FERTILIZANTES NA MESORREGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO  
PARANAÍBA - MINAS GERAIS**

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

Profa. Dra. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi  
Orientadora

**LAVRAS – MG  
2021**

A Deus, origem de tudo que me possibilitou concluir  
essa jornada.

E aos meus pais, por viverem os meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço sobretudo a Deus, pois vem de Dele todas as minhas realizações, e o tudo que preciso para alcançá-las. Senti sua presença ao meu lado durante todos os momentos da graduação.

Aos meus pais, que tanto se doaram para amparar-me durante essa trajetória. Obrigada por serem minha fortaleza e alento. Sou infinitamente grata, por toda dedicação, apoio e amor sem medidas.

Ao meu namorado Gabriel, por ser exemplo de determinação, por todo incentivo, paciência e as diversas formas de auxílio e carinho imensuráveis.

A minha orientadora em especial meus carinhosos agradecimentos por ter aceito a missão, e minha sincera admiração pelo trabalho que realiza com domínio e alegria singulares.

Aos membros da banca Marcelo e Jaqueline, por aceitarem o convite de contribuir com suas experiências na elaboração desse trabalho.

Aos professores e técnicos que transmitiram todo o conhecimento que hoje tenho consolidado.

A UFLA pela acolhida, estrutura e excelência acadêmica.

Agradeço aos avós pelas orações e apoio durante essa caminhada.

A minha irmã Priscilla, sobrinha Maria Laura, cunhado Fernando, madrinhas, tios, tias e todos os familiares e amigos que torceram por mim.

As minhas amigas, em especial Raiane, Flávia e Bruna que mesmo distantes se fazem presentes em meus dias.

## RESUMO

Com o crescimento populacional e conseqüentemente maior consumo de alimentos, as indústrias do setor da agricultura expandiram consideravelmente, e consigo trouxeram a poluição atmosférica. O fluoreto é um dos principais poluentes emitidos pelas indústrias de fertilizantes fosfatados, é lançado no ambiente em concentrações bastante significativas, podendo causar danos a saúde humana, as plantas e ao ambiente. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as emissões de fluoreto de uma Indústria de Fertilizantes X localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, estado de Minas Gerais. A Indústria de Fertilizantes X controla o lançamento do efluente gasoso gerado na unidade de granulação por meio do coletor centrífugo, lavador de gases e filtro de mangas, com intuito de minimizar os impactos e atender a legislação ambiental vigente. Portanto, foi calculado a eficiência desses equipamentos com base nos modelos teóricos De Paola e Theodore (ciclone), e Johnstone (lavador venturi). Além do dimensionamento, para o filtro de mangas foi avaliado o material utilizado e sua aplicabilidade. Também foram verificadas as emissões de fluoreto a partir dos dados de monitoramento isocinético, e os resultados de qualidade do ar, ambos realizados pela Indústria de Fertilizantes X. A eficiência obtida para o lavador venturi do granulador foi 97%. A eficiência média do sistema de controle do secador (ciclone e lavador venturi) é 86% e do sistema de controle do resfriador (filtro de mangas e lavador venturi) é 96%. A análise dos resultados de emissões, apresentaram valores de ultrapassagem dos padrões legais para as 3 chaminés no período de 10 anos avaliados, sendo mais frequente as ultrapassagens no inverno (13%) e outono (11%) e majoritariamente a chaminé do secador tanto no período seco (83%) quanto na média anual (90%). No entanto os valores de qualidade do ar se mantiveram dentro dos padrões de referência nas áreas urbanas. Portanto, recomenda-se para trabalhos futuros uma análise mais detalhada do sistema completo como bombeamento, válvulas, tubulações, manutenção e limpeza, pois esses itens podem estar causando redução pontuais do desempenho dos Equipamentos de controle de Poluição - ECPs.

**Palavras-chave:** poluentes atmosféricos, dimensionamento, controle de emissões, modelos matemáticos.

## ABSTRACT

With population growth and consequently greater food consumption, industries in the agricultural sector expanded considerably, and with it brought air pollution. Fluoride is one of the main pollutants emitted by phosphate fertilizer industries, it is released into the environment in very significant concentrations, which can cause damage to human health, plants and the environment. In this context, the present work aims to evaluate the fluoride emissions from a Fertilizer X Industry located in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba mesoregion, state of Minas Gerais. X Fertilizer Industry controls the release of gaseous effluent generated in the granulation unit through a centrifugal collector, gas washer and bag filter, in order to minimize impacts and comply with current environmental legislation. Therefore, the efficiency of this equipment was calculated based on the theoretical models De Paola and Theodore (cyclone) and Johnstone (venturi washer). In addition to dimensioning, the material used and its applicability were evaluated for the bag filter. Fluoride emissions were also verified from the isokinetic monitoring data, and the air quality results, both performed by Fertilizer Industry X. The efficiency obtained for the venturi washer of the granulator was 97%. The average efficiency of the dryer control system (cyclone and venturi washer) is 86% and that of the cooler control system (bag filter and venturi washer) is 96%. The analysis of the emission results showed values exceeding the legal standards for the 3 chimneys in the 10-year period evaluated, with more frequent exceedances in winter (13%) and autumn (11%) and mostly the dryer chimney both in the dry period (83%) and the annual average (90%). However, the air quality values remained within the reference standards in urban areas. Therefore, it is recommended for future works a more detailed analysis of the complete system, such as pumping, valves, piping, maintenance and cleaning, as these items may be contributing to the reduction in the performance of Pollution Control Equipment - ECPs.

**Keywords:** air pollutants, dimensioning, emission control, mathematical models.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	8
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1.	Atmosfera e poluição do ar.....	10
2.2.	Meteorologia e a dispersão dos poluentes atmosféricos.....	11
2.3.	Produção de fertilizantes no Brasil e Minas Gerais.....	13
2.4.	Poluentes atmosféricos gerados pelas indústrias de fertilizantes .....	17
2.5.	Efeitos dos poluentes atmosféricos gerados pelas indústrias de fertilizantes na saúde e no ambiente .....	19
2.6.	Legislação aplicada à poluição atmosférica .....	21
2.7.	Técnicas de Controle industrial .....	25
2.7.1.	Equipamentos de controle de poluição do ar utilizados em indústrias de Fertilizantes ....	27
2.7.2.	Estudos sobre os equipamentos de controle e poluição do ar.....	30
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1.	Área de estudo .....	32
3.2.	Descrição dos dados .....	34
3.3.	Descrição do processo produtivo de fertilizantes na Indústria de Fertilizantes X.....	35
3.4.	Descrição do sistema de tratamento dos gases e controle do efluente da Indústria de Fertilizantes X .....	36
3.5.	Descrição dos modelos utilizados nos dimensionamentos dos equipamentos de controle de poluição do ar (ECP).....	38
3.5.1.	Coletor centrífugo (Ciclone).....	38
3.5.2.	Filtro de mangas .....	41
3.5.3.	Lavador de gás Venturi.....	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
4.1.	Resultados do dimensionamento dos equipamentos de controle de poluição do ar (ECP) .....	47
4.1.1.	Multiclone .....	47
4.1.2.	Filtro de mangas .....	50
4.1.3.	Lavadores Venturi .....	51
4.2.	Emissões .....	55
4.3.	Qualidade do ar.....	60
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	62
6.	REFERÊNCIAS .....	64

## 1. INTRODUÇÃO

A atmosfera é constituída por gases e partículas, os quais permanecem estáveis entre processos químicos e físicos, formando uma fina camada que envolve a Terra. Entretanto, esse equilíbrio pode ser perturbado com a liberação de contaminantes, que sob condições favoráveis reagem aumentando a concentração ou variabilidade dos componentes atmosféricos, causando danos à saúde e ao meio ambiente.

Assim, “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” é definida pela Resolução nº 491 de 2018 do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, como poluente atmosférico.

A poluição aumenta em paralelo ao crescimento populacional e aos níveis de industrialização. Portanto, foi impulsionada pela Revolução Industrial, quando as técnicas baseadas na queima de grandes quantidades de carvão mineral, madeira e posteriormente óleo combustível começaram a ser adotadas. Desde a primeira metade do século XX, a poluição do ar tornou-se um problema sério nos centros urbanos industrializados, com a presença cada vez maior de automóveis, que vieram unir-se às fábricas, como fontes poluidoras.

No início do século XX, havia cerca de 2 bilhões de pessoas no mundo, que saltaram para 6 bilhões no final do mesmo século (IBGE, 2021). Para atender a demanda, a produção de alimentos precisou aumentar, a partir disso o uso de fertilizantes se tornou essencial, para repor os nutrientes do solo rapidamente, ampliando a produção sem expandir a área. Portanto, o acelerado crescimento da população mundial contribuiu para o aumento das emissões atmosféricas nocivas. Somente em meados do século XX é que a poluição do ar passou a ser vista como um problema de saúde pública, quando diversos países começaram a adotar medidas, inicialmente com o intuito de reduzir os incidentes de concentrações excessivas de poluentes. No entanto, apenas na última década do século XX, as questões ambientais tiveram grandes avanços em termos de conscientização e interesse pelas questões ambientais.

Diversos países relataram episódios críticos de poluição do ar, que impactaram a saúde pública. Nas décadas de 1970 e 1980, Cubatão – SP ficou conhecida como uma das cidades mais poluídas do mundo, em função das grandes emissões industriais, da topografia

acidentada e de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes. O incêndio na Vila Socó (1984) e o vazamento de amônia com evacuação da Vila Parisi (1985) obrigaram as autoridades a adotarem políticas públicas mais restritivas para emissão de poluentes (JASINSKI; PEREIRA; BRAGA, 2011).

A partir desses e outros episódios, o Brasil passou a implementar tecnologias para redução da poluição do ar, através de comandos e controles que vem sendo atualizados. A primeira legislação que dispõe sobre o controle da poluição provocada por atividades industriais surgiu em 1975 pela Lei Federal nº 1.413. Posteriormente, em 1986 e 1989 foram criadas as resoluções CONAMA Nº 18 e 05, que estabeleceram diretrizes para criação do Programa de Controle a Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE e o Programa Nacional de Controle de Poluição do Ar – PRONAR. Com base nos objetivos do PRONAR foram estabelecidas diretrizes instituídas a partir das resoluções CONAMA nº 03 e 08 de 1990, atualizadas e substituídas pelas resoluções CONAMA nº 491 de 2018 e nº 432 de 2011, determinando a adoção de padrões nacionais de qualidade do ar (PQAR) e os limites máximos de emissão na fonte, respectivamente.

Como mencionado, a legislação é importante para controle dos poluentes, e devido o surgimento e avanço das fontes de emissão móveis e fixas, essa relevância se torna maior. Vale a pena ressaltar que outros e diversificados poluentes passaram a compor o ar das cidades, em decorrência da variedade de novos elementos processados nas indústrias química e farmacêutica. No Brasil, as indústrias de fertilizantes apresentam uma expressiva produção, Minas Gerais particularmente, abriga aproximadamente 14% das empresas desse setor (IBGE – Cadastro Central de Empresas, 2018), e como as atividades das fábricas de fertilizantes geram efluentes líquidos e gasosos que contém uma ampla escala de compostos químicos, contribuem fortemente nas emissões de fontes fixas.

As emissões atmosféricas que as indústrias de fertilizantes liberam, em geral, incluem óxidos de enxofre, vapores ácidos, poeira de fertilizante, fluoretos na forma de ácido fluorídrico e tetrafluoreto de silício, elementos radioativos e compostos nitrogenados como amônia, óxidos nítrico e nitroso, aerossóis de sais de amônia. Os fluoretos são os poluentes mais peculiar dessas fábricas, visto que é o mais gerado, originam-se nos processos que transformam as rochas fosfatadas em fertilizantes (GARCIA et al., 2000; apud UNEP, 1998).

Os fluoretos são lançados no ambiente em concentrações bastante significativas, causam danos materiais, como a corrosão de vidro. Ao ser assimilado pelos organismos, este elemento provoca efeitos tóxicos. Os impactos encontrados para emissão de material

particulado são o aumento de doenças respiratórias, ataques cardíacos, arritmia cardíaca e redução da visibilidade do ambiente.

A fim de evitar esses impactos e atender a legislação ambiental, utiliza-se as medidas indiretas e diretas, para controle da poluição atmosférica. As medidas indiretas são ações que visam a eliminação, redução ou afastamento dos poluentes, por meio de localização de polos industriais e combustíveis limpos. Com relação as medidas diretas, possuem o intuito de reduzir a quantidade de poluentes liberados na atmosfera, através da instalação de equipamentos de controle de poluição (ECP), por exemplo filtros de ar como os coletores que atuam a seco ou úmido, utilizados para retenção de material particulado e de gases ou vapores. Os ECPs mais utilizados em indústrias de fertilizantes são ciclones, lavadores de gases e filtro de mangas (NUNES, 2012).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar as emissões de fluoreto de uma Indústria de Fertilizantes X localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, estado de Minas Gerais.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Atmosfera e poluição do ar**

A atmosfera é constituída majoritariamente de nitrogênio e oxigênio, 78 % e 21% respectivamente, e apenas 1% de outros gases, alguns deles são argônio, xenônio, neônio e gás carbônico (ARANHA, 2006). Os seus constituintes são consumidos e reciclados em ciclos espontâneos. Mas ações antropogênicas vêm causando desequilíbrio neste sistema, acumulando substâncias nocivas a saúde e ao meio ambiente, provocando diversos problemas relacionados a poluição do ar, como a redução da camada de ozônio, intensificação do efeito estufa, a acidificação do ambiente, entre outros (GEO BRASIL - IBAMA, 2002; PEREIRA, 2020; CALDEIRA, 2020).

O efeito estufa é um fenômeno que resulta no aquecimento da atmosfera do planeta, intensificado pela emissão de certos gases. Os gases estufa, são aqueles que captam parcialmente pouca radiação solar, enquanto assimilam com maior eficácia a radiação emitida pela superfície da Terra. Os mais relevantes de origem natural são o vapor de água, metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (SANTOS; CÂMARA, 2002). A intensificação desses gases, pode levar a grandes impactos no ambiente como a poluição do ar e possíveis alterações no clima do planeta Terra (MELO, 2019; CALDEIRA, 2020; GOMES 2020;).

Segundo Almeida (1999), as fontes de poluição atmosféricas são “qualquer processo que possa liberar ou emitir matéria ou energia para a atmosfera, tornando-a contaminada ou poluída”. A fim de obter a origem da poluição atmosférica, deve ser analisado os processos envolvidos na formação dos poluentes. Uma vez que os poluentes atmosféricos resultam de processos naturais ou antropogênicos, podendo ser classificados conforme o CONAMA (1990), quanto à sua origem em primários e secundários. Os primários, são emitidos diretamente pelas fontes, alguns exemplos são monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e enxofre, fluoreto, etc. E os secundários são formados através de reações químicas e oxidações de outros poluentes precursores e os constituintes naturais da atmosfera, são eles o ozônio troposférico, nitrato, sulfato, ácido sulfúrico entre outros (DRUMM, 2014; MARIANA, 2019; CAMILLO; SOUZA; RAMSER, 2020).

As causas naturais são todos os processos de emissão que vêm transcorrendo durante milhares de anos, com participação da própria natureza, como por exemplo as emissões de gases provocadas pelas erupções vulcânicas, a suspensão de poeira do solo pelos ventos, os incêndios naturais em florestas entre outros. Com relação aos processos antropogênicos são aqueles criados pela ação do homem, com a inserção de operações industriais, como a queima de combustível para fins de transporte em veículos a gasolina, álcool e diesel ou qualquer outro tipo de combustível, queimadas na agricultura, incineração de lixo, poeiras fugitivas, aplicação de agrotóxicos, produtos voláteis, equipamentos de refrigeração e ar condicionado, entre outros (ALMEIDA, 1999).

Ademais, as fontes de poluição do ar podem ser classificadas em fontes móveis e estacionárias. Todos os veículos de locomoção que possuem motores à combustão, compõem as fontes móveis, seja terrestre, aéreo ou marítimo (BRAIT, 2008). Por outro lado, as fontes estacionárias ou fixas são aquelas que ocupam uma área relativamente limitada, permitindo uma avaliação direta na fonte (BRAIT, 2008; AFFONSO, 2018).

A produção de fertilizantes, que vai desde a mineração até os processos de fabricação de produtos químicos e granulação, é um exemplo de fonte fixa a qual gera em todas as etapas da produção, emissão atmosférica de material particulado e gases prejudiciais a saúde e ao meio ambiente (AIRES; OLIVEIRA; JUNIOR, 2018).

## **2.2. Meteorologia e a dispersão dos poluentes atmosféricos**

A meteorologia influencia diretamente a dispersão dos poluentes, independente da

fonte de emissão. Possui uma incumbência essencial em relação à qualidade do ar, pois os eventos meteorológicos direcionam a difusão de poluentes, posto que, estão presentes na atmosfera.

Segundo Derísio (2012), meteorologia é a ciência que estuda os processos que ocorrem na atmosfera terrestre. Vale ressaltar que, esses processos realizam transporte e dispersão dos poluentes. Considera-se algumas variáveis ao estudar as condições meteorológicas de determinado local: o vento, a precipitação, a umidade relativa, a temperatura, a pressão atmosférica e a radiação. Esses parâmetros são importantes para interpretação da amostragem dos poluentes, pois possibilitarão identificar as variações sazonais das condições do ar e situações meteorológicas para cenários críticos de poluição do ar (NODARI; SALDANHA, 2016).

Avaliando esses parâmetros, verifica-se que a temperatura expressa o grau de aquecimento do ar, e está relacionada com a intensidade da luz solar, pois a inclinação dos raios solares define esse aquecimento. A temperatura é um parâmetro meteorológico significativo na poluição do ar, porque suas mudanças sazonais e diárias afetam a reação fotoquímica e formação de poluentes secundários, que causam danos ao meio ambiente e à saúde pública. Além de afetar a estrutura e intensidade de agitação do ar, responsáveis por diluir os poluentes atmosféricos. Alguns fenômenos como as ilhas de calor e a inversão térmica, estão relacionados a temperatura (VIEIRA, 2009; NODARI; SALDANHA, 2016).

O vento é o primeiro recurso atmosférico quando a função é transportar. O vento origina das diferenças de pressão em função do aquecimento e resfriamento atmosférico (DERÍSIO, 2012). Segundo Nodari e Saldanha (2016), pressão atmosférica é a força que o ar desempenha sobre a superfície da Terra. Portanto, a direção e velocidade do vento define a trajetória e dispersão dos poluentes. A rosa dos ventos, permite obter informações sobre a direção das massas de poluentes do ar, ao relacionar essa direção com o monitoramento da qualidade do ar e as fontes de emissões.

A precipitação também é outro recurso natural de dispersão dos poluentes. Os sistemas de alta pressão (tempo regular) e de baixa pressão (as tempestades), geralmente se deslocam de oeste para leste com velocidades de aproximadamente 30 a 45 km/h. Essas condições de velocidades, conseguem dispersar a maioria dos poluentes atmosféricos para grandes distâncias da fonte. No entanto, mesmo que haja uma concentração mínima de poluentes, se o sistema de alta pressão for estacionário e a emissão de poluentes estável, haverá pouco vento para dispersá-los, facilitando seu acúmulo na atmosfera (GALVÃO FILHO, 1996).

A chuva, a velocidade do vento, o gradiente de temperatura, a turbulência atmosférica, a neve, a insolação, os deslocamentos ascendentes e descendentes de volumes de ar, estão associados a estabilidade atmosférica. Portanto, a estabilidade atmosférica afeta a taxa de difusão de poluentes no ar limpo. Em outras palavras, parte dos poluentes atmosféricos liberados quando o ar está instável é melhor misturada do que quando o ar está estável, porque a estabilidade inibe a movimentação de poluentes (DERÍSIO, 2012; NODARI; SALDANHA, 2016)

A topografia interfere nas ações do vento e conseqüentemente na propagação ou acúmulo dos gases e partículas lançados na atmosfera. Por exemplo, as cidades localizadas em um vale, o ar frio formado à noite nas regiões de maiores altitudes direciona-se para o fundo do vale ao amanhecer. Dessa forma, ocorre a inversão térmica, pois ar próximo ao chão será mais frio que o ar acima dele (GALVÃO FILHO, 1996). Outros exemplos são: o topo das montanhas, que na maioria das vezes possui condições favoráveis de formação do vento, os quais dispersão os poluentes; e as regiões do litoral onde ocorrem as brisas marítimas (ar frio do oceano em direção a superfície terrestre), ocasionam a elevação da concentração dos poluentes (GALVÃO FILHO, 1996).

A umidade é utilizada para descrever a quantidade de vapor d'água presente no ar. Encontra-se a porcentagem pela divisão da razão de mistura real e da razão de mistura de saturação. Vale ressaltar que a quantidade de umidade necessária para a saturação é dependente da temperatura. Quando a atmosfera está saturada de água, a porcentagem é máxima (NODARI; SALDANHA, 2016).

### **2.3. Produção de fertilizantes no Brasil e Minas Gerais.**

Muitos esforços estão sendo mobilizados internacionalmente para instituir um vínculo mais equilibrado entre população, ambiente, produção de alimentos e energia. A coordenação da Organização das Nações Unidas - ONU, estabeleceu os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS que propõem alcançar até 2030, um planeta mais saudável, equitativo e próspero. Agricultura e alimentação estão no centro dessa agenda mundial, e segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, o Brasil está apto para desempenhar um papel de protagonista (EMBRAPA, 2018).

Segundo Cruz et al. (2017), a agroindústria é um dos maiores responsáveis por movimentar a economia brasileira. Nos últimos 50 anos, o Brasil deixou de ser importador e tornou-se um dos principais exportadores de alimentos no mundo, produzindo alimento

para 1,5 bilhão de pessoas aproximadamente. De 1990 em diante, houve um grande estímulo, as exportações se transformaram no combustível do progresso da agricultura brasileira (EMBRAPA, 2018).

No entanto, o uso excessivo do solo, reduziu as condições essenciais necessárias para desenvolvimento das plantas, diminuindo a fertilidade natural, a capacidade de armazenamento e de disponibilidade de água e aeração. Assim, a demanda por fertilizantes aumenta diretamente proporcional à produção agrícola, pois os fertilizantes oferecem as plantas, os nutrientes fundamentais para alcançar um desenvolvimento integral, sem que suceda a deterioração da fertilidade natural dos solos (CRUZ; PEREIRA; FIGUEREDO, 2017).

O uso de fertilizante tem como benefício a relação de alta produção, sem a necessidade de expandir a área total plantada. Segundo dados da FAO, cada tonelada de fertilizante mineral aplicado em um hectare, adaptados com fatores que permitem sua máxima eficiência, equivale à produção de quatro novos hectares sem adubação. (LOPES; GUILHERME, 2009).

À medida que esse processo foi se consolidando, o Brasil foi se transformando em um grande mercado agrícola global. De acordo com os dados da Agrostat (2021), ao analisar as 5 regiões do Brasil no critério consumo doméstico e importação fertilizantes NPK (nitrogênio, fósforo e potássio respectivamente), tem-se o centro-oeste como líder, seguido da região sul e em terceiro o sudeste do país. Na região sudeste, o estado de São Paulo e Minas Gerais apresentam uma alta representatividade nas exportações do agronegócio, responsável por 25,06% dos US\$ 23 bilhões adquiridos pelo país, valor que corresponde apenas ao primeiro trimestre de 2021.

O setor de fertilizantes em Minas Gerais é bastante significativo, com a presença tanto de indústrias de produção de fertilizantes como de unidades misturadoras. Em 2018 foram contabilizadas 86 empresas dentro da classe Fabricação de Adubos e Fertilizantes (20.13-4), estabelecida pela Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE 2.0. Esse grupo inclui fertilizantes organominerais, minerais e sintéticos. Esse nº de empresas, se torna representativo ao relacionar com o país que totalizou no mesmo ano 628 empresas, ou seja, Minas Gerais abriga aproximadamente 14% dessas empresas (IBGE – Cadastro Central de Empresas, 2018).

Os nutrientes derivados de fertilizantes podem ser de origem orgânica, como fertilizantes derivados de resíduos vegetais e animais, ou fertilizantes sintéticos das

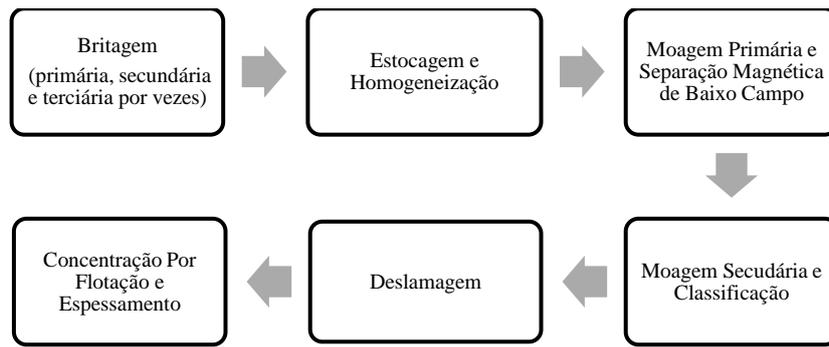
indústrias mineral e petroquímica. Assim, os fertilizantes sintéticos potássicos e fosfatados são adquiridos em reservas minerais, com relação aos fertilizantes nitrogenados têm como principal matéria-prima o gás natural (RODRIGUES; OZORIO; PINTO, et al, 2015)

Como os principais déficits das terras cultivadas são os nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), o fertilizante amplamente produzido e comercializado é um produto composto por uma mistura desses três nutrientes, denominado NPK (RODRIGUES; OZORIO; PINTO, et al, 2015)

Como Brasil é o sexto país com as maiores reservas mundiais de fosfato, seus maiores complexos industriais de fertilizantes químicos produzem fosfato, e conseqüentemente tem uma produção elevada. Segundo dados da U.S. Geological Survey, (2021) o Brasil ocupou a sétima posição em 2020, responsável por 2,46% da produção mundial. O fósforo está presente nas rochas na forma de fosfato. Essas rochas são formadas por sedimentação, geralmente de vida animal, ou rochas ígneas, produzidas por atividade vulcânica. (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2021).

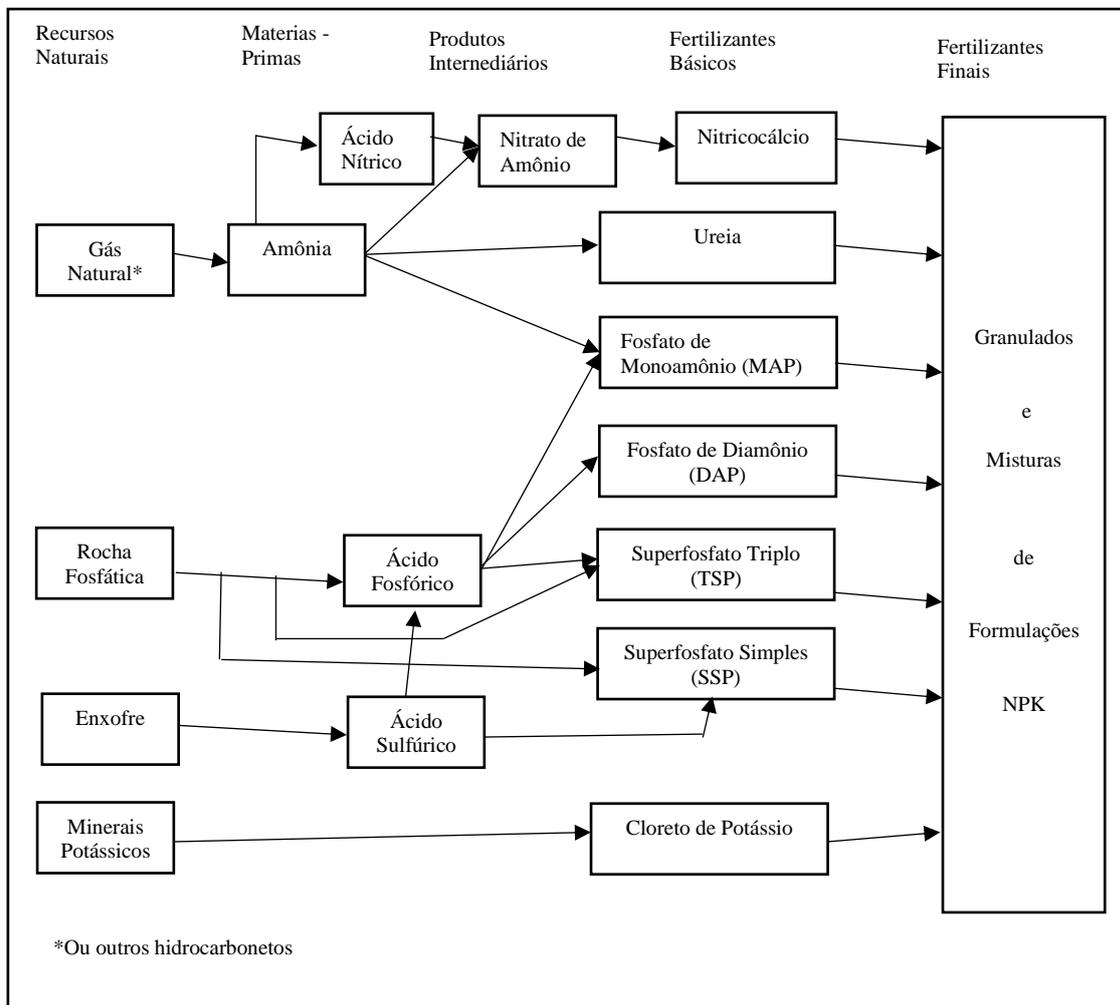
A rochas fosfáticas são mineradas e processadas industrialmente para a obtenção de fertilizantes básicos, que contêm fósforo para serem comercializados. A fase de industrialização inclui uma série de processos químicos e físicos diferentes para transformar as matérias-primas e insumos em produtos intermediários, fertilizantes simples e fertilizantes compostos, e suas formulações são adequadas para cada tipo de planta (CETEM, 2010). A cadeia produtiva após a lavra é indicada no fluxograma a seguir (Figura 1 e 2) (RODRIGUES; OZORIO; PINTO, et al, 2015).

Figura 1 - Etapas de beneficiamento do minério



Fonte: Adaptado de Cunha (2017)

Figura 2 - Cadeia de transformação dos principais produtos da indústria de fertilizantes minerais



Fonte: Adaptado Andrade, et al. (1995).

## 2.4. Poluentes atmosféricos gerados pelas indústrias de fertilizantes

Para identificar os principais impactos que as indústrias de fertilizantes causam no meio ambiente, é necessário analisar as rotas de produção, que vai desde o recebimento das matérias-primas processadas pela indústria mineral até as embalagens ou estoque de produtos a granel para entrega aos distribuidores ou produtores rurais (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010). Apesar de também existir impactos ambientais nas etapas de lavra e beneficiamento serão analisados na sequência os principais aspectos ambientais identificados nas atividades desenvolvidas durante a industrialização que é o foco deste trabalho.

As emissões globais dos gases de efeito estufa originários das indústrias de fertilizantes, segundo Fernandes, Luz e Castilhos (2010), são estimadas em 283 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>), sendo 134 milhões gases de chaminé, 75 de dióxido de carbono puro e 74 de óxido nitroso, estes são gerados principalmente na produção de ácido nítrico. De acordo com o consumo de energia, 92% das emissões estão relacionadas ao componente N, 3,5% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 4,5% K<sub>2</sub>O. Esses números indicam, que a produção de fertilizantes fosfatados é responsável por uma pequena proporção do consumo de energia e das emissões neste setor lançamento de gases de efeito estufa (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010).

Além dos gases de efeito estufa, a indústria de fertilizantes também emite várias outras substâncias. Por exemplo, a produção de ácido sulfúrico e fertilizantes fosfatados, emite óxidos de enxofre e névoa ácida, os quais são responsáveis pela chuva ácida e irritação pulmonar severa. Os principais compostos são H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub>, os quais formam aerossóis de sulfato ao reagir com água e outros poluentes. A eficácia das tecnologias de controle sofre influência direta da aplicabilidade do projeto, a idade das instalações e dos padrões de gestão da unidade (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010)

Durante a fase de superfosfato, ocorre a acidulação da rocha fosfática, com presença no ambiente de vapores de ácidos sulfúrico e fosfórico, e, também, ácido fluorídrico (HF) e tetrafluoreto de silício (SiF<sub>4</sub>) (HUTTNER; MOREIRA, 2000). As emissões causadas pela acidificação da rocha fosfática, chega a conter 2% a 4,5% de flúor e diferentes quantidades de sílica, que prevalece na forma de SiF<sub>4</sub> e HF. A percentagem de flúor liberada nos gases de evasão varia entre 35 a 40% e podem ser recuperados pelos métodos de tratamento de gás na forma de ácido fluorsilícico, que pode ser vendido posteriormente, ou ser neutralizado com carbonato de cálcio. O resto é dividido em ácido fosfórico e fosfogesso.

Uma parte do flúor é encontrada nas águas residuais do processo. Por meio de um processo de remoção eficaz, a concentração alcançada é cerca de 1 a 5 mg / Nm<sup>3</sup> ou 40 g / t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. O fluoreto pode ser transportado a grandes distâncias nas formas de particulado ou gasosa, e sua remoção da atmosfera ocorre por deposição seca, úmida ou por hidrólise (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010 apud UNEP 1998).

No decorrer da produção de ácido nítrico, de acordo com os dados de Fernandes, Luz e Castilhos (2010) apud UNEP (1998), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) emitido varia de 1,2 a 10 kg / t 100% HNO<sub>3</sub>. A queda das emissões é geralmente realizada através da redução catalítica não seletiva. Existem tecnologia aptas para conter cerca de 75% de N<sub>2</sub>O, porém possuem um custo elevado e se adaptam melhor as novas instalações.

Outros óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) são gerados nos processos de formação da amônia e do ácido nítrico. Suas emissões variam de 1 a 2 kg NO<sub>x</sub> / t N durante a produção de amônia e, 6 a 9 kg NO<sub>x</sub> / t N no processo produtivo de ácido nítrico (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010 apud UNEP 1998).

Durante a produção do ácido sulfúrico e fertilizantes fosfatados, são emitidos óxidos de enxofre e névoa ácida. Os compostos mais relevantes são sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), dióxido e trióxido de enxofre (SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub>), os quais possuem habilidades de reagir ligeiramente com água e outros poluentes se transformando em aerossóis de sulfatos (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010 apud UNEP 1998).

Amônia e aerossóis de amônio são componentes naturais da atmosfera. Nas indústrias a fase de granulação, se une através de reação química os três elementos N, P e K (grânulo completo), ou N e P (MAP e/ou DAP) em único grão e na concentração desejada, nessa etapa o grande poluente é a amônia na forma gasosa (HUTTNER; MOREIRA, 2000; FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010 apud UNEP 1998).

Na indústria de fertilizantes, uma vasta quantidade de produtos a granel (pó ou grânulos) são manuseados durante a operação, que produzem um grande volume partículas. Isso acontece em várias etapas desde a produção, o transporte de matérias-primas até os produtos finais. Desse modo é necessário práticas adequadas de gestão e controle do material particulado gerados nesses processos (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010)

## **2.5. Efeitos dos poluentes atmosféricos gerados pelas indústrias de fertilizantes na saúde e no ambiente**

A emissão de poluentes industriais, quando não controlados, podem afetar a saúde e o meio ambiente. As emissões de óxido nitroso na esfera de fertilizantes industriais são responsáveis por cerca de 6% das emissões humanas desse gás (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010). A amônia e o ácido nítrico, causam chuva ácida, smog e precedem o ozônio. Portanto, eles são provocam impactos ao atingirem as regiões próximas das áreas urbanas. Os óxidos de enxofre combinado com o material particulado geram vários danos a atmosfera. Os componentes do enxofre acarretam efeitos negativos para a visibilidade, saúde humana, vegetação e materiais, além de contribuir para a formação da deposição ácida. As partículas finas emitidas no ar reduzem a visibilidade por meio da dispersão e da absorção da luz. Considerando que o ácido sulfúrico e outros sulfatos compõem 5 a 20% do total de material particulado suspenso na atmosfera urbana, eles contribuem consideravelmente para a redução da visibilidade. (CAPANA, 2008; DRUMM et al., 2014; AFFONSO, 2018;).

No entanto, um dos poluentes mais representativos das indústrias de fertilizantes são os fluoretos, proveniente da transformação de rochas fosfatadas em fertilizantes. Esse poluente é liberado no ambiente, interferindo vigorosamente na composição química dos ecossistemas naturais das áreas próximas as fontes de emissão. A contribuição antrópica e a concentração dos compostos de flúor, define se ele será benéfico ou não, por exemplo, grandes quantidades podem gerar efeitos graves ao ser humano, na vegetação, e nos animais (FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010 apud UNEP 1998).

Os fluoretos, quando presentes na atmosfera, podem causar danos materiais, como corrosão, perda do brilho de vidros, e também deposição ácida. Estudos apontaram as fábricas de fertilizantes como principal fonte de fluoreto na atmosfera no município de Rio Grande - RS, que causaram corrosão em isoladores de vidro da rede de alta tensão (GARCIA et al., 2000 apud BRIGONI, 1983; FONSECA, 2007).

Após a emissão, o fluoreto pode ser absorvido pelos organismos vegetais preferencialmente através da superfície de suas folhas. Otto et al. (2007), destaca alguns efeitos causados devido a exposição, como alterações metabólicas, lesões foliares, redução do crescimento e desenvolvimento, até prejuízos ao ecossistema como um todo, provocando o desaparecimento de espécies vegetais menos resistentes à toxicidade do fluoreto, que segundo Garcia et al. (2000) pode causar até implicações na cadeia alimentar

humana.

No entanto, alguns fatores como distância da fonte de emissão, período de exposição e as concentrações emitidas influenciam no aparecimento dos sinais de intoxicação que vegetação exposta ao fluoreto emitido pelas indústrias pode apresentar (BRAGA et al., 2007; CETESB, 2014; OLIVATI, 2015). Espécies de plantas, estágio de desenvolvimento, a condição nutricional, tempo de exposição à luz, a umidade, a temperatura e os ventos também interferem na quantidade que será absorvida pela planta. De acordo com POLI (2002), o flúor na forma particulada resulta em menos danos à vegetação do que a forma gasosa.

Segundo Marques et al. (2015), mesmo em baixas concentrações, o fluoreto apresenta um odor notável que causa irritação e penetra na pele, no sistema respiratório e nos olhos. Uma vez que a pele fica exposta ao fluoreto, possibilita ocorrência de coceiras, e queimaduras graves, além de leves irritações nas narinas e tosse excessiva. Quando em contato com os olhos causa irritação da visão e pálpebras, lacrimação e, em maiores dimensões, as causas são queimaduras graves que leva a perda parcial ou total da visão imediatamente.

As irritações causadas no sistema respiratório são mais nocivas, ao passo que, uma exposição mais leve gera sintomas anestésicos e narcóticos, resultando em depressões cardíacas e respiratórias. Além disso, em exposições de concentrações mais intensas, o resultado é o bloqueio enzimático provocando a paralisação das funções dos pulmões e do coração (MARQUES, et al., 2015)

Em caso de intoxicação, pode ser aguda ou crônica. A intoxicação crônica, ocorre devido a inalação de altas proporções durante muitos anos, geram fluorose óssea, ocasionando aumento da densidade óssea, calcificação dos tendões e dos ligamentos e deformidades ósseas, além de lesões dentárias (CETESB, 2014). Já a intoxicação aguda, é consequência da introdução de compostos fluoretados em um curto período, geralmente decorrente da poluição industrial, e caracteriza-se por sintomatologia gastrointestinal e sinais nervosos (LUCIOLI et al. 2006). A fluorose aguda foi relatada no Brasil em bovinos no Rio Grande do Sul por Riet-Correa, et al. (1983) e em outros países em suínos, ovinos, bovinos (LUCIOLI et al. 2006 apud BAIN, 1953; GEORGSSON e PETURSSON, 1972; PADBERG, 1972).

Todos esses efeitos citados anteriormente indicam que a qualidade do ar nos centros urbanos e regiões próximas a indústria precisa ser monitorada para controlar os impactos. O monitoramento possibilita a avaliar a eficiência do projeto, verificando o atendimento

aos padrões de emissão e de qualidade do ar, a fim de garantir um ambiente em perfeitas condições para se viver (BARROSO e FERREIRA, FONSECA, 2007; 1986; SILVA 2021)

Barroso e Ferreira (1986) afirmam que o ato de monitorar a concentração de poluentes emitidos no ar é de suma importância para indicar melhorias nos equipamentos de controle de poluição do ar, avaliar as perdas de material e possibilitar aproveitamento no processo produtivo. Através do monitoramento os órgãos ambientais conseguem fiscalizar os empreendimentos, fontes de emissão (INEA, 2010; SILVA 2021) implantados principalmente em regiões próximas a centros urbanos. Essas informações permitem ainda quantificar e expressar através de índices o nível de qualidade do ar de determinado local.

## **2.6. Legislação aplicada à poluição atmosférica**

No Brasil, o monitoramento da poluição atmosférica e o controle da qualidade do ar são previstos por legislação, que estabelecem padrões nacionais de qualidade do ar e de emissões. O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA estabelece, por meio de resoluções, as normas para o controle da emissão de poluentes do ar por fontes fixas e móveis. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais resoluções CONAMA base da prevenção e do controle da poluição atmosférica (ALMEIDA, 1999).

Tabela 1: Resumo de requisitos legais sobre poluição atmosférica no Brasil

LEGISLAÇÃO	DESCRIÇÃO
Res. CONAMA Nº 18 de 06 de maio de 1986	Institui, em caráter nacional, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE e estabelece limites máximos de emissão para veículos automotivos dos ciclos Otto e Diesel.
Res. CONAMA Nº 05 de 15 de junho de 1989	Institui o Programa Nacional De Qualidade Do Ar – PRONAR, estabelece padrões de qualidade e enquadra o território nacional em classes.
Res. CONAMA Nº 08 de 06 de dezembro de 1990	Dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição.
Res. CONAMA Nº 297 de 26 de fevereiro de 2002	Estabelece os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos.
Res. CONAMA Nº 315 de 29 de outubro de 2002	Institui novas etapas para o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE, em caráter nacional.
Res. CONAMA Nº 382 de 26 de dezembro de 2006	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.
Res. CONAMA Nº 418 de 28 de junho de 2009; Res. CONAMA Nº 451 de 03 de maio de 2012	Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente e determina novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso.
Res. CONAMA Nº 436 de 22 de dezembro de 2011	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 2 de janeiro de 2007, complementando assim a Resolução nº 436/2006.
Res. CONAMA Nº 415 de 24 de setembro de 2009	Dispõe sobre nova fase (PROCONVE L6) de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário e dá outras providências
Res. CONAMA Nº 432 de 13 de julho de 2011	Estabelece novas fases de controle de emissões de gases poluentes por ciclomotores.
Res. CONAMA Nº 491 de 19 de novembro de 2018	Revoga a Res. Conama Nº 03/90 e Estabelece Padrões de Qualidade do Ar, Níveis de Alerta, Atenção e Emergência e Métodos de Amostragem dos poluentes.

Fonte: Adaptado de CHAMBERLAIN (2021)

No que se refere as fontes móveis, o PROCONVE tem o objetivo de reduzir e controlar a contaminação atmosférica por veículos automotores, através da criação de

limites máximos de emissão e prazos para que essas melhorias sejam efetivadas.

Por outro lado, o PRONAR, com o intuito de promover a orientação e controle da poluição atmosférica emitidas por fontes fixas, estabeleceu como estratégias os padrões nacionais de qualidade do ar e de emissão na fonte, implementação de uma política de prevenção de deterioração da qualidade do ar, a implementação da rede nacional de monitoramento do ar e o desenvolvimento de inventários de fontes e poluentes atmosféricos prioritários.

O padrão de qualidade do ar – PQAR pode ser entendido como o valor máximo para a concentração de uma substância atmosférica que assegure a saúde de todos. Os padrões de qualidade do ar são baseados em pesquisas científicas e impactos gerados por cada poluente e definidos em níveis que proporcionem uma margem de segurança suficiente (LISBOA; KAWANO, 2007; ALMEIDA, 1999).

A Resolução CONAMA n° 03/90 foi revogada pela Resolução n° 491, de 19 de novembro de 2018, a qual atualmente rege os padrões de qualidade do ar. A nova resolução acrescentou dois poluentes, Partículas de até 2,5 µm (MP<sub>2,5</sub>) e Chumbo (Pb), como padrão de controle obrigatório, estabeleceu o conteúdo mínimo para o relatório de avaliação da qualidade do ar, revogou os padrões de qualidade do ar primário e secundários, que passaram a ser adotados sequencialmente em 4 etapas:

- 1° etapa: Padrões de Qualidade do Ar Intermediários PI-1;
- 2° etapa: Poluentes Monóxido de Carbono, Partículas Totais em Suspensão e Chumbo;
- 3° e 4° etapa: Padrões de Qualidade do Ar Intermediários e Final – PI-2, PI-3 e PF, serão adotados, em seguida, levando em consideração os Relatórios de Avaliação de Qualidade do Ar – RAQA e os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas – PCEA, elaborados pelos órgãos de meio ambiente (MEDEIROS, 2020; SANTOS, 2021).

Entretanto, nenhuma das resoluções CONAMA definem um padrão de referência para o fluoreto, e o governo dos Estados Unidos apenas identifica os potenciais perigos para saúde pública e para o ambiente (EPA 1993). No entanto, o Grupo de Trabalho Federal-Provincial sobre Objetivos e Diretrizes de Qualidade do Ar elaboraram um documento de avaliação científica que recomenda níveis de referência para o fluoreto de hidrogênio, em uma escala uniforme para avaliar a qualidade do ar em todas as partes do Canadá e orientar aos governos nas decisões de gestão de risco, como planejamento de estratégias de controle e estabelecimento de padrões locais (BOURGEAU; et al, 1996). O estudo concluiu que a vegetação é mais sensível do que a saúde humana aos efeitos tóxicos

do fluoreto, portanto, a Indústria de Fertilizantes X adotou  $2,7 \mu\text{g} / \text{m}^3$  como valor de referência para fluoretos totais, que está dentro do intervalo ( $0,85$  a  $2,90 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ) das máximas concentrações diárias das simulações de diversas regiões do mundo apresentadas no relatório do Grupo de Trabalho Federal-Provincial.

Considerando a necessidade do estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes do ar (padrões de emissão) em fontes fixas, como presume o PRONAR, foi elaborada a Resolução CONAMA 08/90. A Resolução CONAMA 382/06, fixa limites específicos de emissão para cada tipo de fonte ou combustível utilizado, se aplica às atividades cuja Licença de Instalação foi requerida após 02/01/2007, a partir da sua vigência. Complementando a resolução anterior, desde 2011, vigora a Resolução CONAMA 436, que estabeleceu os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de Licença de Instalação anteriores a 02/01/2007. Assim, as indústrias antigas passaram a reduzir substancialmente suas emissões (LISBOA; KAWANO, 2007).

A Resolução CONAMA nº 5, de 15/06/89 define padrão de emissão como o valor máximo que pode ser liberado para atmosfera pelas fontes de poluição, ou seja, uma concentração de contaminantes por unidade de vazão aceitável. Entretanto esses limites variam de acordo com a classificação de uso desejado nos diversos setores. Contrariamente aos padrões de qualidade do ar, os padrões de emissão podem ser empregados às mais variadas atividades industriais (LISBOA; KAWANO, 2007; SILVA, 2021).

O órgão responsável pelo controle ambiental em Minas Gerais é a Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, a qual integra os órgãos segmentados de apoio do Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM e está vinculada à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD.

Algumas das Deliberações Normativas mais relevantes com relação a poluição atmosférica são: a DN 01/81 é a primeira do estado que definiu normas e padrões para qualidade do ar; a DN 011 de 1986 instituiu normas e padrões para emissões de poluentes atmosféricos, para fontes fixas, móveis; a DN 01/92 COPAM Nº 187 DE 19/09/2013 estipula condições e valores máximos de emissão de contaminantes atmosféricos para fontes fixas e dá outras providências. O padrão de emissão do fluoreto de acordo a Resolução COPAM nº187, para indústrias de fertilizantes é  $0,10 \text{ Kg/t}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  alimentado em unidades de produção de fosfatados, fonte fixas das operações de granulação, secadores e resfriadores.

## 2.7. Técnicas de Controle industrial

Os padrões de emissão são estabelecidos e monitorados pelos órgãos ambientais e as tecnologias de precaução e mitigação são efetuadas pelos empreendimentos. O processo de poluição do ar possui quatro estágios, a produção, a emissão, o transporte e a recepção de poluentes. Em todos os estágios é possível interferir para minimizar os impactos da poluição (DERÍSIO, 2012).

O controle da poluição do ar compreende medidas indiretas e diretas. As medidas indiretas de acordo com Almeida (1999), são ações que possuem o objetivo de eliminar, reduzir, diluir, segregar ou afastar os poluentes. A fim de empregar essas medidas pode se utilizar tecnologias e combustíveis limpos, adequar a localização de polos industriais e realizar planejamento urbano. E as medidas diretas representam práticas com a finalidade de diminuir a concentração de poluentes lançadas na atmosfera por meio da instalação de equipamentos de controle (filtros de ar) (ALMEIDA, 1999; LISBOA e SCHIRMER, 2007; FIGUEIREDO, 2016).

Mediante a implantação de Equipamentos de Controle de Poluição do Ar (ECP), diretamente nos pontos de saída das fontes geradoras, os empreendimentos enquadram as emissões atmosféricas às exigências dos padrões legais. Esse tipo de equipamento funciona como uma espécie de "filtro", que remove parte dos poluentes presentes nas emissões e as torna relativamente limpas. Em outras palavras, esses dispositivos removem alguns contaminantes de um meio gasoso, transferindo-os para outro meio, sólido ou líquido, ou seja, não elimina o problema ambiental (FERNANDES, 2003).

Os ECP's são geralmente classificados tanto em função das propriedades físico-químicas dos poluentes quanto em função dos mecanismos de controle envolvidos (sedimentação gravitacional, impactação, interceptação, difusão, forças eletrostáticas e força centrípeta, termoforese, etc.) em seu funcionamento e ações de controle com ou sem o uso de água ou de outros líquidos em específicos (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

A emissão industrial de material particulado tem sido controlada por coletores secos como os mecânicos inerciais e gravitacionais, mecânicos centrífugos (ciclones), filtro de tecido (filtro-manga), precipitador eletrostático, entre outros, ou ainda por coletores úmidos como os lavadores torres de spray (pulverizadores), lavadores com enchimento, lavador ciclônico, lavador de gases (venturi), lavadores de leito móvel, entre outros. Quando a emissão industrial é gases ou vapores, o controle pode ser por coletores secos como os incineradores de gás com chama direta ou catalíticos, adsorvedores, ou por coletores

úmidos como os lavadores em geral, condensadores, tratamento biológico, entre outros (LISBOA E SCHIRMER, 2007, NUNES, 2012; FIGUEIREDO, 2016).

Fonseca (2007), destaca as tecnologias mais aplicadas no controle de emissões de fluoretos gasosos, que abrangem os três sistemas de depuração, através de via seca, via semi-seca e via úmida. Estes sistemas fundamentam-se na reação das substâncias do efluente gasoso a serem capturadas, quando estiverem em contato com o meio sólido ou líquido. Os reagentes usualmente mais empregados na depuração são: carbonato, hidróxido e óxido de cálcio, bicarbonato e carbonato de sódio, hidróxido de sódio. Estes processos, que na maioria das vezes são eficientes no tratamento dos fluoretos, assim como os demais processos de fim de linha, possuem um custo de aquisição, e necessitam de investimentos para manutenção e operação.

Nunes (2012) orienta que para seleção do equipamento de controle de poluição atmosférica para um dado processo industrial deve-se levar em consideração um rol de parâmetros e propriedades: grau de purificação desejada; concentração, tamanho e distribuição granulométrica das partículas; propriedades físicas e químicas dos contaminantes; condições do ar de transporte; facilidade de limpeza e manutenção; fator econômico; método de eliminação do material coletado. O autor cita ciclones, filtro de mangas, lavadores de gases e multiciclones como os equipamentos mais utilizados para indústrias de cerâmica (as quais também emitem fluoreto). Para a indústria cerâmica que utiliza o processo de produção via úmido nos atomizadores, o autor constatou que o filtro de mangas é o equipamento de controle de emissão mais eficiente.

Os lavadores Venturi são muito utilizados no tratamento de efluentes gasosos devido sua habilidade no controle tanto de poeira quanto de aerossóis (CHEREMISINOFF, 1993) apud (MEILI, 2006). Isso faz com que o equipamento tenha um enorme campo de aplicações industriais: fertilizantes, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, papel e celulose, tintas, cimento, metalúrgica, entre outras (MEILI, 2006). De acordo com Natale et al. (2018), a eficiência de um lavador venturi depende sobretudo da relação líquido/gás (vazão de líquido introduzido e a vazão de gás na garganta), comprimento da garganta e velocidade do gás no interior do lavador.

Chang (2017), sugere o filtro de mangas para tratamento de particulados e gases emitidos durante o manuseio, formulação, mistura, peneiramento e transporte dos fertilizantes. Como controle para formação de gases contendo fluoretos, produto principal da reação entre a polpa de rocha fosfática ultrafina e o ácido sulfúrico, além de vapor d'água e material particulado. CETEM (2010), ressalta que processo de lavagem dos gases gera

ácido fluossilícico, que pode ser comercializado, ou seja, gera duplo benefício. Logo, é importante conhecer o processo produtivo e os tipos de poluentes gerados na fonte de emissão.

### **2.7.1. Equipamentos de controle de poluição do ar utilizados em indústrias de Fertilizantes**

#### **2.7.1.1. Ciclone**

Os Ciclones são coletores que utilizam principalmente o mecanismo da força centrífuga. Essa força é proporcional ao aumento do diâmetro da partícula, a sua velocidade tangencial e a redução do diâmetro do coletor (LISBOA, SCHIRMER, 2007).

Lisboa e Schirmer (2007), afirma que a eficiência de um ciclone aumenta em função do diâmetro, da densidade da partícula, da velocidade dos gases, do comprimento do cone e do diâmetro de saída, e diminui em consequência do aumento da viscosidade do gás e do diâmetro do corpo do equipamento (LACERDA, 2007). E por sofrer influência da geometria do equipamento, os multiciclones são mais eficientes.

A desigualdade entre as pressões estáticas na entrada e na saída do ciclone resultam na perda de carga. A parte mais relevante da queda de pressão é conferida às perdas dentro do equipamento, uma vez que o tensor de viscosidade do fluxo rotacional turbulento causa dissipação de energia (OGAWA, 1997 apud SILVA, 2006; LACERDA, 2007; JUNIOR, 2014).

Algumas das vantagens da implantação multiciclones apresentadas por Lisboa e Schirmer (2007), Furieri e Castilho (2009), Figueiredo (2016) e Rocha (2020) estão relacionadas a maior eficiência em relação ao ciclones e excelente capacidade de separação, devido aos pequenos diâmetros, além, de apresentarem menor perda de carga para eficiências equivalentes, em razão do elevado número de unidades que o constitui. Os ciclones tem custo de investimento reduzido, os multiciclones custam menos ainda, ocupam menor espaço para instalação (quando se pretender manter a mesma eficiência) e resistem melhor à erosão. Ambos podem ser utilizados em condições severas de operação e operar em amplas faixas de temperatura.

Os autores também citam as desvantagens que os dois possuem como baixa eficiência para partículas pequenas, possibilidade de entupimento no caso de partículas adesivas ou higroscópicas (mais sério em multiciclones), possibilidade de abrasão para determinadas partículas e determinadas velocidades, não devem ser utilizados para

partículas adesivas e em geral ambos necessitam de segundo coletor para atender emissão exigida.

### **2.7.1.2. Lavador de gases**

Johnstone et al. (1954) apud Gonçalves (2000), analisaram todos os mecanismos de coleta existentes em um lavador venturi e chegaram a conclusão que o mecanismo de impactação inercial seria o prevalente. Porém, este mecanismo passa a ser gradualmente menos atuante com a redução do tamanho das partículas, devido à baixa inércia das mesmas. Desse modo, partículas com diâmetros extremamente pequenos ( $< 0,3 \mu\text{m}$ ), a difusão browniana é o mecanismo predominante (PILAT; NOLL, 2000 apud MEILI, 2006; BIANCHINI; et. al (2018) apud SILVA, 2020)

Meile (2006) e Nunes (2012) destacam algumas vantagens do lavador venturi como alta eficiência de coleta na remoção de partículas com diâmetros entre 0,5 e 5,0  $\mu\text{m}$ , nesta faixa de tamanho os lavadores venturi podem ser tão ou mais eficientes que qualquer outro equipamento. São equipamentos compactos, uma vez que opera a altas velocidades de gás, não necessita de grande volume para trabalhar com grandes vazões de gás, podem reutilizar água de lavagem em lavadores que operam com orifício grande em comparação ao tamanho das partículas, possuem baixo custo inicial de instalação, podem tratar pós-explosivos e inflamáveis com segurança, ser utilizados em gases a altas temperaturas e para coleta de partículas adesivas, além do que, não há restrições de utilização quanto à umidade do efluente a ser tratado.

Em relação as desvantagens, Lisboa e Schirmer (2007), Meile (2006) e Nunes (2012) selecionaram a alta perda de carga para alcançar elevada eficiência de coleta, levando a um custo operacional maior, necessidade de usar materiais resistentes à corrosão, formação de pluma visível proveniente da condensação da umidade contida nos gases, material coletado (resíduo sólido) é úmido e pode precisar de tratamento para sua reutilização, necessita incluir tratamento de efluentes líquidos e apresenta elevado custo operacional, devido ao consumo alto de energia atribuído a alta queda de pressão total.

### **2.7.1.3. Filtro de tecido**

A eficiência de coleta de um filtro de manga geralmente não é um problema. Tendo em vista que, um filtro de manga corretamente projetado, em boas condições de operação, alcança eficiências maiores que 99% na coleta de partículas dentro do intervalo de tamanho desde submicron a muitas centenas de microns de diâmetro (FURIERI, CASTILHO, 2009).

Conforme Macintyre (1990) apud Barbosa (2015), as interações de interceptação, impactação e movimento browniano das partículas com o elemento filtrante, são os responsáveis pela eficiência elevada desses equipamentos. O processo de coleta pode envolver mais de uma ação concomitantemente, mas estes são os principais mecanismos que ocorrem durante a separação nos filtros de mangas (CLEZAR, 2009 apud NUNES, 2012).

A camada de particulado funciona como um filtro muito eficiente, pois retém as partículas menores que àquelas possíveis de se filtrar pelas fibras do tecido. No entanto, após a limpeza dos tecidos, a eficiência de coleta de cada uma das mangas é relativamente baixa, já que, grande parte do particulado é transferido diretamente ou permeia o tecido. Porém, as partículas se acumulam novamente nas fibras por ação dos mecanismos de interceptação e difusão, formando outra película, assim, a eficiência de filtração retorna o crescimento em uma taxa considerável (FURIERI, CASTILHO, 2009)

Essa camada, também provoca aumento na resistência ao fluido, sendo esse um ponto negativo perante o mencionado anteriormente. A perda de carga no filtro de manga, ocorre por ação de um conjunto de fatores num todo: tecido, camada de particulado e estrutura física do equipamento (por ser baixa é desconsiderada). As perdas de carga devido ao tecido e a camada de particulado, depende da velocidade de filtragem, da pressão de pulso, da viscosidade do gás, da espessura da respectiva camada e da permeabilidade dos materiais utilizados (FURIERI, CASTILHO, 2009). Portanto, a perda de carga em filtros de tecido, é a somatória da perda de carga do filtro limpo mais a resistência imposta pela camada de partícula depositada no filtro (LISBOA; SCHIRMIR, 2007).

Apesar de todos esses aspectos, projeto de equipamentos para controle de emissões por filtro de tecido compreende sucintamente, a escolha do tipo de filtro (manga ou envelope) e o meio filtrante a ser utilizado, o dimensionamento da área de filtragem e escolha do sistema de limpeza. Em algumas situações, onde a corrente gasosa possui temperatura e umidade inadequada para o filtro de tecido, será preciso regular as condições antes (LISBOA, SCHIMER, 2007).

Resumidamente, Furieri e Castilho (2009), Nunes (2012) e Rocha (2020) citam as vantagens do uso de filtro de mangas, com relação a outros equipamentos: alta eficiência de coleta (até 99,9%, mesmo para partículas muito pequenas), perda de carga não excessiva, opera para diversos tipos de particulado e pode ser projetado em módulos com partes pré-moldadas a serem montadas. Em relação as propriedades do gás, o equipamento é resistente a corrosão, pouco sensível a flutuação de vazão e concentração, recuperação

fácil do material. Para completar, manutenção e operação simples com custo de operação moderados, não gera resíduos líquidos e possui vida útil longa, chegando 20 anos.

Porém, para manter tantos benefícios há algumas desvantagens, descritas por Lisboa e Schimer (2007), Furieri e Castilho (2009), Nunes (2012) e Rocha (2020), como a necessidade de grandes áreas para instalação, restrição a altas temperaturas e agentes corrosivos, custo de manutenção elevado, pode requerer tratamento especial das mangas para determinadas aplicações, difícil localização das mangas furadas, e não pode ser operado em condições que haja condensação de umidade.

### **2.7.2. Estudos sobre os equipamentos de controle e poluição do ar**

Rodrigues (2001) realizou experimentos utilizando um ciclone com geometria semelhante à de Lapple, onde a parte cônica metálica foi trocada por uma parte cônica confeccionada em tecido filtrante. Utilizou-se três tipos de tecidos, que possuíam permeabilidades distintas e analisou-se experimentalmente a performance dos ciclones filtrantes operando com suspensão de pó de rocha fosfática em ar. A partir dos resultados obtidos, o autor concluiu que eficiência de coleta, foram levemente menores nos ciclones filtrantes em relação ao ciclone convencional.

Lacerda (2007) estudou através de um planejamento composto central, que utiliza o método estatística de superfície de resposta, a influência de quatro variáveis geométricas dos ciclones, sobre o diâmetro de corte, eficiência de coleta e número de Euler. Utilizou o pó de rocha fosfática nos experimentos e realizou simulações com técnicas de fluidodinâmica computacional. Os diâmetros de corte obtidos para os ciclones filtrantes foram superiores aos do convencional, indicando uma menor eficiência na coleta de partículas finas.

Junior (2014), desenvolveu um trabalho para investigar experimentalmente o desempenho de um ciclone úmido com configuração proposta por Stairmand (1951) adaptado com bicos injetores de água para a coleta de material particulado de rocha fosfática com diâmetro mediano de  $4,66 \mu\text{m}$ . No intuito de verificar a influência da injeção de água, o trabalho teve como objetivo melhorar a eficiência global de coleta do ciclone úmido quando comparado a seco. Para isso, foi verificada a influência das configurações de bicos e da relação da vazão de líquido/gás (L/G) na eficiência de coleta. Foram instalados 8 bicos injetores de água do tipo leque. Variou-se a relação da vazão de líquido/gás (L/G) de 0,65 a  $2,20 \text{ L/m}^3$  para 3 diferentes configurações de bicos. A temperatura na saída diminuiu em relação à entrada em função do aumento da razão L/G.

Já a umidade relativa do gás aumentou conforme o aumento da razão L/G. O ciclone operando a seco apresentou eficiência média de 76,7% e a melhor eficiência média a úmido foi de 85,3%. Foi determinada a eficiência de coleta fracionária apenas para a condição operacional que resultou na melhor eficiência global. A adaptação do ciclone Stairmand com bicos injetores de água resultou em uma melhoria de 8,6% na eficiência global de coleta.

No trabalho de Silva (2020), foi avaliado a eficiência do lavador Venturi retangular para coleta de material particulado inferior a 2,5  $\mu\text{m}$ , lançados devido a queima do bagaço de cana-de-açúcar. Comparou-se as eficiências parciais de coleta em função do diâmetro do particulado, aos modelos teóricos de eficiência de Johnstone et al. (1954), Calvert et al. (1977) e Leith e Cooper (1980). O autor concluiu que, o modelo de Calvert foi o que mais aproximou dos valores experimentais, mas ainda ficou abaixo das eficiências reais para velocidades maiores.

Brink e Contant (1958) avaliaram as melhores condições de operação do lavador Venturi Pease-Anthony, de injeção por spray e com seção retangular, utilizado em uma planta de ácido fosfórico. O lavador possuía uma garganta de 6 x 34 in e comprimento de 12 in, com ângulos de seção convergente de 25° e seção divergente de 2, 2°. Após o lavador havia um ciclone com duas estruturas de sprays horizontais na garganta, sendo uma com 23 orifícios e a outra com 22. O objetivo era avaliar quais das variáveis, vazão do spray, a velocidade do spray e número de bicos de injeção, exerciam influencia na eficiência global de coleta. As eficiências globais de coleta encontrada foram superiores a 98%, devido ao número de bicos e velocidade do spray que tiveram papel expressivo nos resultados de eficiência.

Meili (2006) estudou a influência das variáveis velocidades do gás, vazão de líquido e comprimento da garganta na eficiência global de coleta em lavadores venturi com seção circular e comparou aos modelos de Calvert, Calvert modificado e Johnstone. Para a realização dos experimentos foram utilizados dois planejamentos experimentais fatoriais 33 do tipo completo, um para cada diâmetro de garganta, resultando em 27 experimentos cada um. Foi utilizado como material particulado nos experimentos o pó de rocha fosfática de Patos de Minas-MG de densidade de 3,040g/cm<sup>3</sup>. Os valores experimentais de eficiência global de coleta foram relacionados com os valores obtidos através dos 3 modelos teóricos. O autor observou que o modelo de CALVERT ajustou melhor os resultados em condições de maiores velocidades. Isto pode ser explicado pelo fato de que

a faixa de aplicação do modelo é entre 60 e 120 m/s de velocidade na garganta, velocidades superiores às utilizadas neste trabalho.

Molina (2014) realizou um estudo de caso de uma empresa produtora de fertilizantes, onde foi implantado um sistema composto por ciclone e lavador de gases em série, fabricados pela própria empresa, para tratamento dos poluentes emitidos pela fornalha do secador. Foi realizada uma inspeção no sistema de tratamento de gases, para medir a eficiência de operação do equipamento, o lavador de gases resultou em uma eficiência média de abatimento de 80% de material particulado, nas condições operacionais do dia da análise.

Filho (2008), realizou um trabalho sobre o monitoramento de emissões de poluentes após os equipamentos de Filtros de Mangas (Bag House) nas Indústrias de Ferro-liga. Constatou-se a eficácia do controle de material particulado em Filtro de Mangas, mantendo a emissão em níveis seguros e atendendo as especificações das Normas Ambientais. Outros fatores relevantes para a manutenção de bom nível de controle foram a eficiência do Sistema de Resfriamento dos Gases, que permite o trabalho seguro do Filtro de Mangas sem flutuações de temperatura que poderiam comprometer o material constituinte das mangas, e a existência de um Programa de Manutenção Preventiva do Sistema de Controle de Emissões que o mantém em perfeitas condições de funcionamento, evitando defeitos e falhas no controle das emissões.

Barbosa (2015), apresentou um trabalho sobre a seleção de um sistema para captar e tratar o ar contaminado por emissão de particulado sólido, proveniente da descarga de soja por caminhões no porto de Paranaguá/PR, através do uso da Ventilação Local Exaustora e utilização de Filtro de Manga. O objetivo foi projetar equipamento, e aplicar metodologia para medida de controle de emissão, visando assim atender as resoluções vigentes relativas aos níveis máximos de emissões atmosféricas permitidos. O arranjo proposto mostrou sua viabilidade de construção a fim de controlar a emanação de particulado sólido na descarga de soja, e também atender os aspectos legais, uma vez que a eficiência do Filtro de Manga está acima de 90% o que reduziria este nível de poluente para  $57,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de partículas em suspensão.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Área de estudo**

O estado de Minas Gerais está dividido em 12 Mesorregiões: Noroeste de Minas, Norte de Minas, Jequitinhonha, Vale do Mucuri, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Central Mineira, Metropolitana de Belo Horizonte, Vale do Rio Doce, Oeste de Minas, Sul e Sudoeste de Minas, Campos das Vertentes e Zona da Mata (IBGE, 2021).

O estado contabilizava 61.426 empresas industriais em 2019, sendo os principais setores de extração de minerais metálicos, construção, metalurgia, alimentos, serviços industriais de utilidade pública, derivados de petróleo e biocombustíveis, e químicos (PORTAL MINAS GERAIS, 2021).

A Indústria de Fertilizantes X está situada na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba - TMAP (Figura 3), com 2.424.736 habitantes distribuídos nos seus 66 municípios (IBGE, 2021). Entre os principais grupamentos industriais da química da região, o de fertilizantes continua sendo o setor de maior importância, com localização estratégica.

Figura 3 - Mapa do Brasil derivando contorno do Estado de Minas Gerais com a identificação da mesorregião em estudo.



Fonte: Abreu (2006)

O clima predominante da Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba de acordo com a classificação de Koppen é Aw - clima tropical de savana com estação seca de inverno, ou seja, possui o inverno seco e o verão chuvoso com predominância dos sistemas intertropicais e polares (OLIVEIRA, FALEIROS, SANTOS, 2012; FRANCO, 2020).

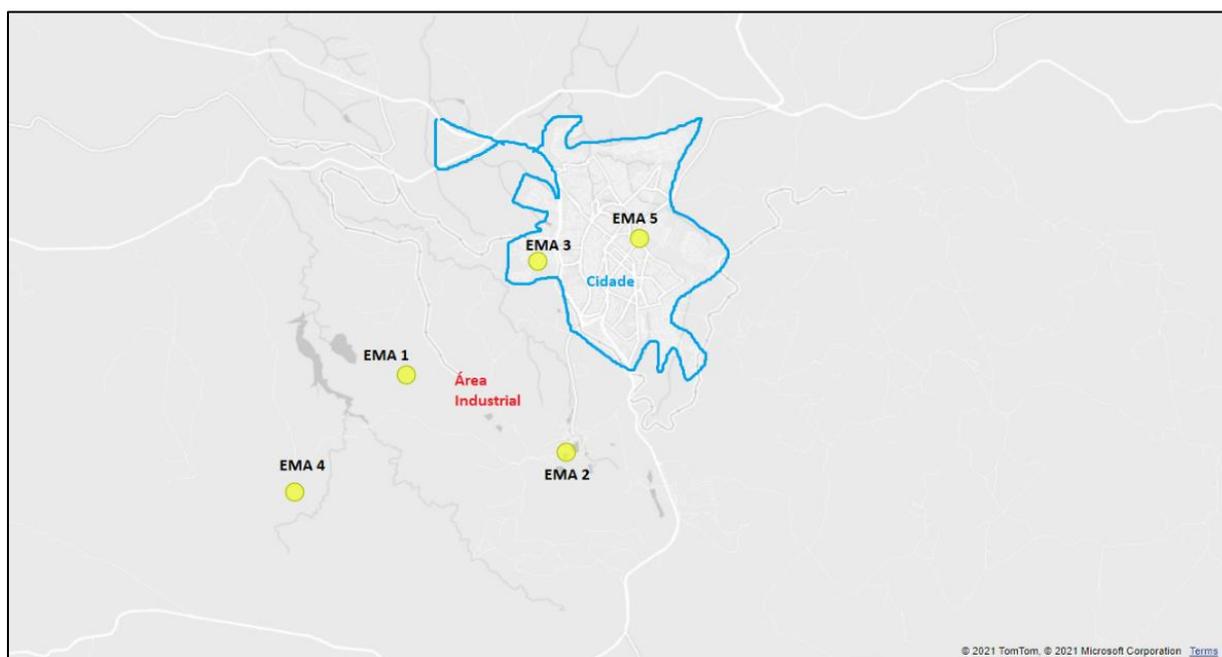
### 3.2. Descrição dos dados

Foram utilizados dados das variáveis meteorológicas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Também foram utilizados dados de emissões da amostragem isocinética (consiste em retirar uma amostra do fluxo de gás na mesma taxa que está se movendo através do duto ou chaminé) para o período de 2012 a 2021, e de qualidade do ar de 2014 a outubro de 2021, fornecidos pela Indústria de Fertilizantes X. A Indústria de Fertilizantes X segue todas as orientações das legislações e entidades ambientais, controlam os poluentes emitidos no processo produtivo por meio de ECPs e monitoram as emissões e a qualidade do ar nas proximidades da indústria.

A amostragem isocinética foi realizada uma vez a cada quadrimestre, total de 3 campanhas anuais. Foi utilizado o método de íon específico para determinar ácido fluorídrico e fluoreto particulado em chaminés e dutos de fontes. O resultado é expresso no parâmetro Fluoretos Totais (kg/t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> alimentado). O monitoramento da qualidade do ar é feito diariamente em pontos estratégicos, próximo a indústria e a população como apresentado na figura 4, para verificar a influência dos gases emitidos na qualidade do ar da cidade.

Figura 4- Esquema de localização das Estações de Qualidade do Ar – EMAs.



Fonte: Do autor

### 3.3. Descrição do processo produtivo de fertilizantes na Indústria de Fertilizantes X

No fluxograma abaixo (Figura 5) é apresentada a etapa de beneficiamento da rocha fosfática, que recebe o minério extraído e já moído pela britagem, para realizar homogeneização, moagem, separação, classificação, deslamagem e concentração conforme indicado anteriormente na Figura 1.

A unidade de acidulação, recebe esse material e adiciona-se o ácido sulfúrico, a fim de formar os fosfatos solúveis (monocálcio e bicálcio), uma vez que, o concentrado apatítico é insolúvel (fosfato tricálcio), ou seja, a planta não consegue absorver o fósforo. A acidulação produz o Super Fosfato Simples - SSP em pó e o ácido fluossilícico, que são comercializados. No entanto, o fertilizante em pó é enviado para a unidade de granulação, pois esse processo oferece alguns benefícios como facilitar o transporte, armazenamento e aplicação, além de evitar dispersão dos fertilizantes pela ação do vento.

Na unidade de granulação, adiciona o TSP (30% de  $P_2O_5$ ) à matéria prima principal (SSP) que possui 15% de  $P_2O_5$ , para chegar na concentração de fósforo necessária (23% de  $P_2O_5$ ), simultaneamente com vapor, ácido sulfúrico, água e amônia (quando houver produções de formulações nitrogenadas). Como o granulador é um vaso rotativo, o processo físico gerado é o principal contribuinte para formação dos grãos, juntamente com as reações químicas. Para tirar umidade (10% de água livre), o composto passa pelo secador (tambor rotativo) etapa onde insere gases com temperatura elevadas (850 a 1100 °C) aquecido pelas fornalhas, os gases saem com temperatura aproximada de 90 a 110 °C.

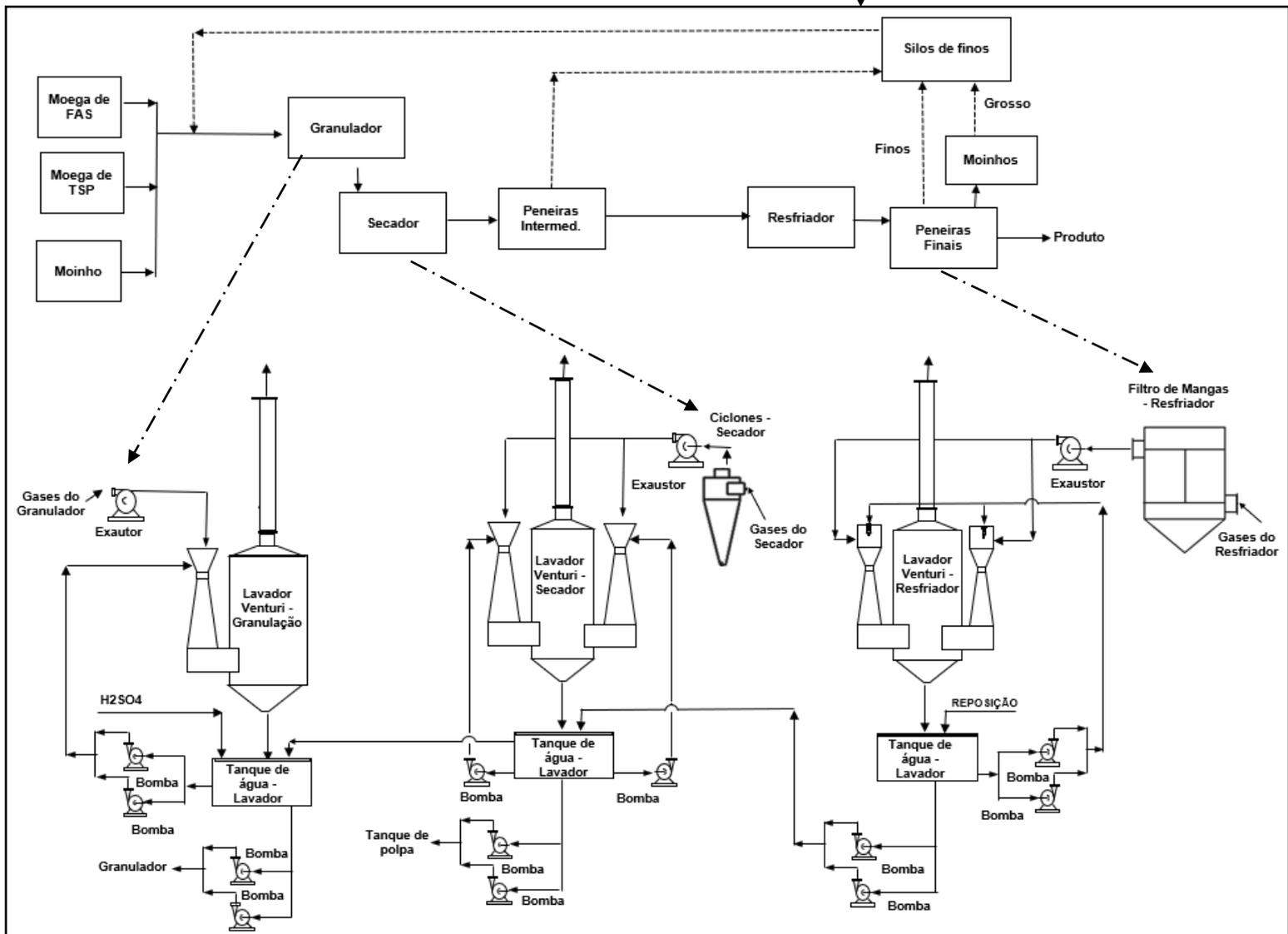
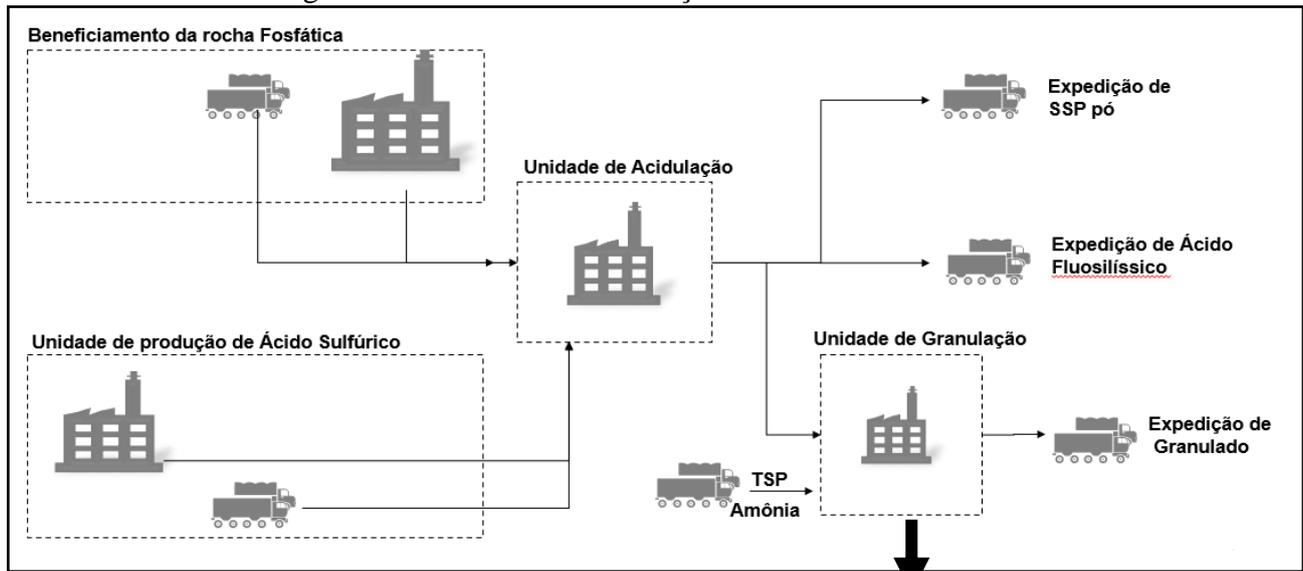
Na sequência passa pelas peneiras intermediárias, onde separa os finos que retornam para início do processo, e os grãos maiores são resfriados, para evitar o empedramento durante o armazenamento. Por fim, são direcionados para as peneiras finas, que separam o produto final dos grãos que não possuem a granulometrias ideal, alguns ainda são moídos antes de retornar à alimentação do processo. O efluente gerado é reutilizado no processo, e os gases de cada etapa possui um tratamento independente, apesar do circuito de água ser interligado.

### **3.4. Descrição do sistema de tratamento dos gases e controle do efluente da Indústria de Fertilizantes X**

O sistema de tratamento dos gases do granulador possui um lavador venturi, com pontos de lavagem tangencial e torre com demister, para separação de gotículas (Figura 5). O exaustor captura os gases do granulador, e transfere o fluxo diretamente para o lavador. A lavagem e a purga são realizados por duas bombas, onde as mesmas operam intercaladas (uma principal e outra reserva). A alimentação de água, ocorre por meio de vaso comunicante com o tanque de recirculação do lavador - secador. A purga do lavador, é realizada através da alimentação do licor no granulador. Há também uma linha de dosagem de ácido sulfúrico para o tanque deste lavador, que é utilizado quando há produções de formulações nitrogenadas, pois o ácido possibilita que a amônia arrastada do granulador seja retida pelo licor de lavagem, sendo reaproveitada no processo.

Em relação ao fluxo de gases gerados no secador, o exaustor realiza a tiragem, os mesmos passam inicialmente por uma bateria de 8 ciclones em paralelo, depois pelo exaustor, para posteriormente ser transferido para o lavador (Figura 5). O lavador é composto por dois venturi com lavagem tangencial interligados na mesma torre de separação de gotículas com demister. A lavagem e a purga também são realizados por duas bombas, sendo cada uma direcionada para um dos Venturi. A reposição de água é realizada pela transferência do licor do lavador do resfriador e a principal linha de purga do lavador é a do licor para o processo de acidulação (tanque de polpa)

Figura 5 - Fluxograma Indústria de Fertilizantes X, com detalhes dos processos de tratamento dos gases da Unidade de Granulação



Fonte: Do autor

E por fim, o fluxo de gases liberados pelo resfriador, são retirados através do exaustor e passam primeiramente pelo filtro de mangas que é dividido em dois, depois por um segundo exaustor, e na sequência é transferido para o lavador (Figura 5). O sistema também é composto por dois lavadores venturi com bicos spray interligados na mesma torre de separação de gotículas com demister. A lavagem e a purga utilizam duas bombas intercaladas. A purga do lavador - resfriador transfere o licor para o tanque do lavador - secador. A reposição de água é realizada prioritariamente pela água do dique da granulação ou pela água bruta.

### 3.5. Descrição dos modelos utilizados nos dimensionamentos dos equipamentos de controle de poluição do ar (ECP)

#### 3.5.1. Coletor centrífugo (Ciclone)

Os ciclones são muito utilizados como pré coletores, uma vez que possui eficiência baixa para partículas pequenas (diâmetro < que 5 µm). A eficiência de ciclones é muitas vezes caracterizada pelo seu "diâmetro crítico", podendo coletar com 100% de eficiência, ou com seu "diâmetro de corte", a partícula é coletada com 50% de eficiência (LISBOA, SCHIRMER, 2007). Nesse trabalho, utilizou-se a equação 1 e 2 de De Paola e Theodore para calcular a eficiência fracionada do ciclone convencional tipo Lapple:

$$E_{ci} = \frac{1}{1+(d_{50}/d)^2} \quad (1)$$

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu_p w}{2\pi N_v V_i \rho_p}} \quad (2)$$

*Sendo:*

$E_{ci}$  = Eficiência fracionada coleta (%)

$D$  = diâmetro da partícula (m)

$D_{50}$  = diâmetro de corte (m)

$\mu_p$  = viscosidade do gás (kg/ms)

$w$  = largura da seção de entrada do ciclone (m)

$N_v$  = velocidade do gás na entrada do ciclone

$\rho_p$  = densidade da partícula (kg/m<sup>2</sup>)

O conhecimento da perda de carga é um dos elementos essenciais para o levantamento do consumo de energia e o aprimoramento dos parâmetros do ciclone (OGAWA, 1997 apud SILVA, 2006; LACERDA, 2007; JUNIOR, 2014).

Existem diversos modelos para estimar a perda de carga em ciclones. Neste estudo utilizou-se o método de Shepherd e Lapple, para definir a perda de carga de material particulado em ciclones de entrada tangencial. Por este método, a perda de carga é expressa por (FURIERI; CASTILHO, 2009):

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_g V_i^2 C_{pd} \quad (3)$$

$$C_{pd} = K \frac{HW}{D_e^2} \quad (4)$$

Sendo:

$\Delta P$  = perda de carga (mm H<sub>2</sub>O)

$\rho_g$  = densidade do gás (kg/ m<sup>3</sup>)

$v_i$  = velocidade do gás na entrada (m/s)

$C_{pd}$  = coeficiente de perda de carga devido à pressão dinâmica

$H$  = altura da seção de entrada (m)

$W$  = largura da seção de entrada (m)

$D_e$  = diâmetro do duto de saída dos gases (m)

$K$  = é uma constante que depende da configuração do ciclone e condições de operação.

Adotou-se o valor 16, utilizado para ciclones de entrada tangencial (CETESB, 1990).

Existem condições de operação recomendadas para cada tipo de ciclone. No caso do ciclone Lapple o intervalo de velocidades recomendado é entre 6 e 21 m/s (CETESB, 1990; SILVA; QUADRI; MACHADO, 2006). Portanto, para calcular a eficiência do ciclone adotou-se uma velocidade inicial de 15 m/s.

Os dados que caracterizam o gás e as partículas na entrada do ciclone fornecidos pela Indústria de Fertilizantes X são a vazão do gás, densidade da partícula e do gás, viscosidade do gás, concentração de partículas, diâmetro médio e fração mássica, estão nas tabelas 2 e 3 a seguir. Além desses parâmetros, utilizou outros parâmetros como diâmetro do ciclone, n° de ciclones, área de entrada, n° de voltas que o gás realiza no ciclone, diâmetro de corte e as dimensões do ciclone, para calcular a eficiência de coleta fracionária (equação 1) e total (equação 5) , perda de carga (equação 3 e 4), emissão inicial (equação 6) e final (equação 7), e concentração de saída (equação 8 e 9). Equações 5, 6, 7, 8 e 9

utilizadas (LISBOA, SCHIRMER, 2007):

$$E_{ct} = \sum (m_i E_i) \quad (5)$$

$$E_i = Q_g C_i \quad (6)$$

$$E_f = E_i (1 - E_{ct}) \quad (7)$$

$$C_s = C_i (1 - E_{ct}) \quad (8)$$

$$C_{SCNTP} = C_s [(T_g + 273)/273] 1/P \quad (9)$$

Onde:

$E_{ct}$  = Eficiência total de coleta (%)

$Q_g$  = Vazão do gás (m<sup>3</sup>/s)

$T_g$  = Temperatura dos gases (°c)

$C_s$  = concentração de saída (mg/m<sup>3</sup>)

$E_i$  = emissão inicial (kg/h)

$E_f$  = emissão final (kg/h)

$C_{SCNTP}$  = concentração de saída nas condições normais de temperatura e pressão.

Tabela 2 - Dados de granulometria das partículas na entrada do ciclone instalado na etapa de secagem dos fertilizantes

Parâmetro	Diâmetro médio ( $d_{pimédio}$ )	Massa ( $m_i$ )
Unidade	µm	%
Valores Fracionados	0	9,69
	2,5	9,68
	5	10,03
	8	6,42
	10	15,51
	16	8,56
	20	16,58
	32	7,07
	40	10,02
	63	2,84
	80	3,60

Fonte: Industria de Fertilizantes X

Tabela 3 – Características dos gases e ciclone instalado na etapa de secagem dos fertilizantes

Parâmetro	Unidade	Valores
Nº de ciclones ( $n_c$ )		8
Vazão do Gás ( $Q_g$ )	$m^3/s$	37,50
Densidade da partículas ( $\rho_p$ )	$kg/m^3$	2490
Densidade dos gases ( $\rho_g$ )	$kg/m^3$	0,75
Viscosidade do gases ( $\mu_g$ )	$kg/m.s$	2,17E-05
Temperatura dos gases ( $T_g$ )	$^{\circ}C$	102
Umidade ( $U_g$ )	%	19,3
Concentração Partículas ( $C_i$ )	$mg/Nm^3$	21290,88
Concentração Partículas ( $C_f$ )	$mg/Nm^3$	4372,86
Pressão ( $P_{atm}$ )	atm	0,91

Fonte: Industria de Fertilizantes X

### 3.5.2. Filtro de mangas

O filtro manga apresenta alta eficiência de coleta. E os principais mecanismos responsáveis pela alta eficiência de coleta, eficiências maiores que 99%, são as interações entre interceptação, impactação e movimento browniano das partículas com o elemento filtrante. Isto é, o processo de coleta pode envolver mais de uma ação concomitantemente durante a separação nos filtros de mangas.

O projeto de equipamentos de controle tipo filtro de tecido segundo Lisboa e Schirmer (2007), envolve sucintamente a escolha do tipo de filtro a ser utilizado (manga ou envelope), a escolha do sistema de limpeza, o meio filtrante a ser utilizado e o dimensionamento da área de filtragem necessária. Quando necessário, deve adequar as condições de temperatura e umidade do fluxo gasoso antes de entrar no filtro de tecido.

O dimensionamento da área filtrante depende da velocidade de filtragem. A determinação da velocidade de filtragem envolve o tipo de partícula a ser coletada, sua concentração, o material filtrante, as características da linha de corrente e da fibra, e o sistema de limpeza. Para a escolha da velocidade de projeto, deve se avaliar as experiências anteriores de aplicações com poeiras de características semelhantes (LISBOA, SCHIRMER, 2007; FILHO, 2008; FURIERI, CASTILHO, 2009; BARBOSA, 2015). A Indústria de Fertilizantes X definiu o valor de 1,49 m/min como velocidade de projeto, e

posteriormente foi ajustada para 0,96m/min.

Furieri e Castilho (2009) orientam que o projeto da câmara de filtros, deve ser elaborado de modo a equilibrar a otimização da velocidade de filtração com os custos de instalação. Para seleção dos tecidos a orientação do autor é avaliar o tipo de trançado, pois este, está relacionado com as propriedades de desprendimento das partículas.

O meio filtrante utilizado no equipamento que coleta os gases do resfriador da unidade de granulação da Indústria de Fertilizantes X é PP/PP 551 CS60 100% propileno com tela, e o sistema de limpeza aderido é o jato de ar comprimido. Adotado o valor da relação ar - pano (velocidade), e conhecida a vazão de projeto, determina-se a área total de filtração das mangas conforme Equação 10 (FURIERI; CASTILHO, 2009):

$$A_{ftotal} = \frac{Q}{V} \quad (10)$$

*Sendo:*

Q = vazão do gás (m<sup>3</sup>/s)

A<sub>ftotal</sub> = área total de filtração (m<sup>2</sup>).

V = velocidade de filtração (m/s)

As dimensões das mangas a serem utilizadas é definido através das experiências anteriores de aplicação, e da disponibilidade do mercado, quando não fornecida pode ser calculada através da equação 12 (FURIERI; CASTILHO, 2009). Com a área unitária das mangas, determina-se o número de mangas necessárias no projeto conforme equação 11.

$$N_{mangas} = A_{ftotal} / A_{fmanga} \quad (11)$$

$$A_{fmanga} = \pi \Phi L \quad (12)$$

*Sendo:*

A<sub>fmanga</sub> = área de filtração da manga (m<sup>2</sup>/manga)

N<sub>mangas</sub> = número de mangas

Φ = diâmetro da manga (m)

L= comprimento da manga (m)

Os parâmetros que caracterizam o fluxo gasoso e dados do projeto do filtro estão na Tabela 4. Para o dimensionamento foi utilizado os valores ajustados de vazão do filtro

e taxa de filtração, além do comprimento e diâmetro. Nota-se que o valor da perda de carga é fornecido, uma vez que o cálculo depende de características bastante peculiares referente ao material, geralmente o fabricante informa.

Tabela 4 – Características do filtro de mangas e do fluxo gasoso na entrada do equipamento, instalado na etapa de resfriamento dos fertilizantes

Parâmetros	Unidade	Valor de projeto	Valor ajustado
Nº de mangas projeto ( $n_{manga}$ )		912	-
Área filtrante ( $A_{totalfiltração}$ )	m <sup>2</sup>	1562	-
Diâmetro (d)	m	0,15	0,15
Altura (h)	m	3,66	3,66
Vazão do filtro ( $Q_f$ )	m <sup>3</sup> /h	140000	90000
Taxa de filtração ( $v_f$ )	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *min	1,49	0,96
Perda de pressão máxima ( $\Delta P$ )	mmCA	150	-
Temperatura dos gases ( $T_g$ )	°C	-	50
Umidade dos gases ( $U_g$ )	%	-	6
Temperatura de operação do filtro ( $T_f$ )	°C	máx 85	-

Fonte: Industria de Fertilizantes X

### 3.5.3. Lavador de gás Venturi

Existem vários modelos matemáticos específicos e teorias para a determinação da eficiência de lavadores venturi, os principais são o modelo de Calvert e o de Johnstone. Nesse trabalho, foi utilizado o modelo de Johnstone, pois é a analogia mais simples e antiga utilizada para indicar a eficiência global de coleta de um lavador venturi. A eficiência desse modelo é dada por (CETESB, 1987 apud LISBOA, SCHIRMIR, 2007; MEILE, 2006):

$$E_{ci} = 1 - e^{(-kQ_l/Q_g\sqrt{K_1})} \quad (13)$$

Sendo:

$E_{ci}$ = eficiência de coleta (%)

K = constante empírica

$Q_l$ = vazão de líquido (m<sup>3</sup>/h)

$Q_g$ = vazão de gás (m<sup>3</sup>/h)

$K_1$ = parâmetro de impactação inercial

No controle da emissão de poluentes por meio do lavador de gases, as partículas são deslocadas do fluxo gasoso para o líquido de lavagem mediante mecanismos de impactação inercial, deposição gravitacional, interceptação ou difusão browniana.

O parâmetro de impactação inercial é igual a metade do número de Stokes, (equação 14). Este número adimensional equivale a razão entre a força necessária para paralisar uma partícula deslocando-se a uma velocidade  $v$ , a resistência viscosa do fluido (MEILI, 2006).

$$k_1 = \frac{Ch \cdot d_p^2 \cdot \rho_p \cdot V_g}{18 \cdot \mu_g \cdot D_c} \quad (14)$$

*Sendo:*

$\rho_p$  = densidade da partícula ( $g/cm^3$ )

$d_p$  = diâmetro da partícula ( $cm$ )

$V_g$  = velocidade do gás na garganta ( $m/s$ )

$D_c$  = diâmetro da gota ( $\mu m$ )

$\mu_g$  = viscosidade do gás ( $g/cm.s$ )

$Ch$  = fator de correção de Cunningham, fator de correção em decorrência do deslizamento entre a partícula e o gás, pode ser definido pela equação (MEILI, 2006):

$$Ch = 1 + \frac{6,21 \cdot 10^{-4} \cdot T}{d_p} \quad (15)$$

*Sendo:*

$T$  = Temperatura do gás ( $K$ )

Para determinar o diâmetro médio da gota, considerou o modelo empírico de Nukiyama e Tanasawa obtido através de experimentos com atomização pneumática. Para condições típicas como o ar e a água em condições padrão, pode considerar equações simplificadas deste modelo como (MEILE, 2006):

$$D_g = \frac{50}{V_g} + 91,8 \left( \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1,5} \quad (16)$$

*Sendo:*

$D_g$  = diâmetro da gota ( $m$ )

$V_g$ = Velocidade do gás ( $cm/s$ )

$Q_g$ = vazão dos gases ( $m^3/h$ )

$Q$ = vazão do líquido ( $m^3/h$ )

O lavador venturi tem como principal desvantagem a elevada perda de carga inevitável para seu funcionamento. Segundo Calvert (1968, 1977a) apud Gregori (2020), a energia gasta com a aceleração do líquido é muito maior do que a energia perdida devido ao atrito. Portanto, em seu estudo, igualou a força necessária para mudar o momento do líquido com a perda de carga do equipamento e, considerou a velocidade inicial nula para o líquido. A equação de perda de carga definida por Calvert é (LISBOA, SCHIMIR, 2007):

$$\Delta P = 0,0008 V_g^2 \frac{Q_L}{Q_g} \quad (17)$$

*Sendo:*

$\Delta P$  = perda de carga ( $mmH_2O$ )

$V_g$ = velocidade do gás ( $m/s$ )

Além das equações dos modelos teóricos citados, também utilizou a equação abaixo para calcular a eficiência total de coleta:

$$E_{ct} = \sum (m_i E_i) \quad (18)$$

De acordo com Guerra (2009), o Venturi é dimensionado de modo que o gás atinja uma velocidade superficial na garganta normalmente entre 40 e 150 m/s. A CETESB, 1987 apud Lisboa e Schirmer (2007); Alvares, (2003) apud Figueiredo (2016) indicam valores entre 60 a 180 m/s, já Gomide (1980) apud Junior (2014) cita velocidades no intervalo de 60 a 200 m/s. Portanto, adotou a velocidade do gás na garganta do venturi igual a 100 m/s.

Os dados de granulometria (Tabela 5) utilizados para o dimensionamento dos lavadores foram fornecidos pela Indústria de Fertilizantes, com exceção dos dados referentes ao granulador, pois são de literatura (Meile, 2006), assim como o valor de densidade da partícula (Tabela 6). Os parâmetros que caracterizam os gases (Tabela 6), utilizados no cálculo de eficiência fracionária e total, e da perda de carga dos lavadores venturi foram: temperatura, densidade, viscosidade e vazão. Também foram necessários os valores de vazão do líquido diâmetro médio fracionário, fração mássica, relação líquido - gás, diâmetro da gota, fator de correção de Cunningham e o parâmetro de impactação.

Parâmetros citados anteriormente estão na tabela 6 e 7 a seguir:

Tabela 5 - Dados de granulometria das partículas na entrada dos 3 lavadores ventui

Lavador	Granulador		Secador		Resfriador	
Parâmetro	Diâmetro médio ( $d_{pimédio}$ ) *	Massa ( $m_i$ )*	Diâmetro médio ( $d_{pimédio}$ )	Massa ( $m_i$ )	Diâmetro médio ( $d_{pimédio}$ )	Massa ( $m_i$ )
Unidade	$\mu\text{m}$	%	$\mu\text{m}$	%	$\mu\text{m}$	%
Valores Fracionados	0,13	0,04	0	30,60	0,5	33,60
	0,26	1,24	2,5	22,17	2,5	16,80
	0,45	5,65	5	15,51	5	17,40
	0,82	10,37	8	6,80	8	4,50
	1,67	15,90	10	13,18	10	10,80
	3,58	14,38	16	4,10	16	3,00
	7,68	17,18	20	5,67	20	5,80
	16,49	19,38	32	1,01	32	2,50
	35,38	10,95	40	0,86	40	3,50
	62,30	3,32	63	0,07	63	1,00
			80	0,04	80	1,30

\* Dados literatura

Fonte: Valores do lavador granulador Meile (2006), e valores do lavador secador e granulador fornecidos pelas Industria de Fertilizantes X

Tabela 6 – Características do gás na entrada dos 3 lavadores e do líquido de lavagem

Parâmetro	Unidade	Lavador - Granulador	Lavador - Secador	Lavador - Resfriador
Temperatura dos gases ( $T_g$ )	$^{\circ}\text{C}$	65	105	61
Densidade da partículas ( $\rho_p$ )	$\text{g}/\text{cm}^3$	3,04*	0,7389	0,8753
Viscosidade do gases ( $\mu_g$ )	$\text{g}/\text{cm.s}$	0,00022	0,00022	0,00022
Vazão do Líquido ( $Q_l$ )	$\text{m}^3/\text{h}$	125	1100	350
Vazão do Gás ( $Q_g$ )	$\text{m}^3/\text{h}$	52000	146000	101000
Umidade ( $U_g$ )	%	48	16	1

\* Dados literatura

Fonte: Industria de Fertilizantes X

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados cálculos, de eficiência e perda de carga, conforme modelos teóricos descritos na seção 3.5, e os resultados podem ser conferidos na sequência.

#### 4.1. Resultados do dimensionamento dos equipamentos de controle de poluição do ar (ECP)

##### 4.1.1. Multiclone

O multiclone é o primeiro sistema de tratamento dos gases gerados no processo de secagem dos fertilizantes (Figura 5), seguido pelo lavador venturi, que será mencionado posteriormente. Nas tabelas 7 e 8, podem ser observados os valores dos parâmetros calculados e as proporções das relações geométricas estabelecidas por Lapple, de cada um dos 8 ciclones. Esses parâmetros foram utilizados para estimar a eficiência de coleta fracionada, total e perda de carga, apresentados nas Tabelas 9 e 10 a seguir.

Tabela 7 - Parâmetros de dimensionamento do multiclone instalado na etapa de secagem dos fertilizantes

Parâmetro	Unidade	Valores
Área de entrada do ciclone ( $A_i$ )	$m^2$	2,5
Diâmetro do ciclone (D)	m	1,58
Diâmetro de corte ( $D_{50}$ )	$\mu m$	7,41
Número de voltas ( $N_v$ )		6
Concentração de partículas inicial ( $C_i$ )	$mg/m^3$	14104,78

Fonte: Do autor

Tabela 8- Relações geométricas do ciclone tipo Lapple instalado na etapa de secagem dos fertilizantes

Dimensões do ciclone (Lapple)	Unidade	Relação	Dimensões
Altura de entrada (H)	m	0,5 D	0,79
Largura de entrada (W)	m	0,25 D	0,40
Profundidade do duto de saída (S)	m	0,625 D	0,99
Diâmetro do duto de saída ( $D_s$ e $D_e$ )	m	0,5 D	0,79
Altura do corpo cilíndrico ( $L_b$ )	m	2,0 D	3,16
Altura do corpo cônico ( $L_c$ )	m	2,0 D	3,16
Altura total ( $L_b+L_c$ )	m	4,0 D	6,32
Diâmetro do duto de descarga do pó ( $D_d$ )	m	0,25 D	0,40

Fonte: Do autor

Os dados de granulometria fornecidos foram organizados em intervalos, para realizar o cálculo da eficiência fracionada. Pode-se observar na tabela abaixo que a medida que aumenta o diâmetro médio da partícula, maior é a eficiência fracionada. Isso é possível devido o mecanismo da força centrífuga, que conforme dito anteriormente por Lisboa e Schimer (2007), e Lacerda (2007) essa força é proporcional ao aumento do diâmetro da partícula. Dessa forma, quanto maior o diâmetro da partícula, maior a ação das forças de corpo atuantes (força centrífuga e de gravidade), e assim, maior a eficiência de coleta (FURIERI, CASTILHO, 2009).

Tabela 9 – Eficiência de coleta fracionada correspondente ao diâmetro médio para o ciclone instalado na etapa de secagem dos fertilizantes

Parâmetro	Faixas de diâmetro ( $d_{pi}$ )	Diâmetro médio ( $d_{pimédio}$ )	Massa ( $m_i$ )	Eficiência ( $E_{ci}$ )	$(m_i) \times (E_{ci})$
Unidade	$\mu m$	$\mu m$	%	%	% x %
Valores Fracionados	0-20	10,00	59,89	0,65	38,66
	20-40	30,00	23,65	0,94	22,29
	40-60	50,00	10,02	0,98	9,80
	60-80	70,00	2,84	0,99	2,81
	>80	80,00	3,60	0,99	3,57

Fonte: Do autor

Ao observar a granulometria das partículas de entrada no ciclone na Tabela acima 60% possuem diâmetro médio inferior a 20  $\mu m$ . Dentro dessa faixa, foi verificado na

Tabela 2, que fração mássica de partículas inferiores 5  $\mu\text{m}$  contabiliza um total de 19 %, um valor significativo, tendo em vista que o ciclone possui baixa eficiência para partículas menores que 5  $\mu\text{m}$ , conforme mencionado por Lisboa e Schimer (2007) e Rocha (2020). Portanto, influencia no resultado da eficiência total de coleta.

Tabela 10 – Dimensionamento do ciclone instalado na etapa de secagem dos fertilizantes

Parâmetro	Unidade	Resultados
Eficiência ( $E_{ct}$ )	%	77,13
Perda (P)	%	22,87
Perda de carga ( $\Delta P$ )	mmH <sub>2</sub> O	67,41
Emissão inicial ( $E_i$ )	kg/h	1904,15
Emissão final ( $E_f$ )	kg/h	435,39
Concentração de saída ( $C_s$ )	mg/m <sup>3</sup>	3225,14
Concentração de saída para as CNTP ( $C_{sCNTP}$ )	mg/Nm <sup>3</sup>	4868,29
Quantidade coletada	kg	1468,75

Fonte: Do autor

A eficiência total de coleta obtida para cada ciclone foi aproximadamente 77%, para todas as faixas de diâmetro. Junior (2014) também encontrou uma eficiência semelhante, 76%, para um ciclone de configuração proposta por Stairmand (1951) para a coleta de material particulado de rocha fosfática, com diâmetro mediano de 4,66  $\mu\text{m}$ . No experimento realizado por Lacerda (2007), para 25 configurações geométricas, os resultados experimentais de eficiência de coleta realizado com pó de rocha fosfática para ciclone convencional variaram de 84% a 94 %.

Os ciclones podem ser classificados de acordo com a eficiência e perda de carga, da seguinte forma:

Tabela 11 – Classificação da eficiência do ciclone em relação a perda de carga

Perda de carga ( $\Delta P$ )	Unidade	Eficiência
$50 < \Delta P < 100$	mmH <sub>2</sub> O	Baixa
$100 < \Delta P < 200$	mmH <sub>2</sub> O	Média
$\Delta P > 200$	mmH <sub>2</sub> O	Alta

Fonte: Adaptado de Lisboa e Schimer (2007)

A perda de carga estimada para o multiciclone foi 67,41 mmH<sub>2</sub>O, como pode ser observado, ficou dentro do intervalo que indica baixa eficiência. Furieri e Castilho (2009) relata que ciclone de baixa eficiência, em função da baixa perda de carga, não consegue remover do fluxo partículas < 10 µm. Isso justifica as observações anteriores.

Os autores também explicam que, maiores eficiências ocorrem com aumento da velocidade do fluxo gasoso, devido a ação da força centrífuga. Porém, isso acarreta em um aumento da perda de carga, que irá demandar maior trabalho do exaustor. Toda via, seria uma possibilidade de melhorar a eficiência do ciclone.

#### 4.1.2. Filtro de mangas

Os valores obtidos no dimensionamento do filtro de mangas podem ser observados na Tabela 12. Este é o primeiro equipamento que recebe os gases gerados no processo de resfriamento dos fertilizantes (Figura 5), na próxima seção (4.2.3), será apresentado os resultados do lavador venturi que opera em série ao filtro.

Tabela 12 - Dimensionamento filtro de mangas instalado na etapa de resfriamento do fertilizantes

Parâmetro	Unidade	Valor de projeto	Valor ajustado
Amanga ( $A_{manga}$ )	m <sup>2</sup> /manga	1,71	1,71
Área filtrante ( $A_{totalfiltragem}$ )	m <sup>2</sup>	1562	1562
Nº de mangas ( $n_{manga}$ )		912	912

Fonte: Do autor

Ao comparar os dados fornecidos pela Indústria de Fertilizantes X com calculados, expostos na tabela acima, percebe-se que o valor calculado para área total de filtragem foi igual ao valor de projeto fornecido pela Indústria de Fertilizantes X, e conseqüentemente o nº de mangas também se manteve igual. Essa similaridade ocorreu, porque, com a redução da vazão a velocidade de filtragem foi ajustada, na equação 10, constata-se que os dois parâmetros são diretamente proporcionais.

Rocha (2020) afirma que a filtragem por tecido é o método mais confiável para retenção de contaminantes sólidos do ar, obtendo uma eficiência acima de 99%. Mesmo com flutuações na velocidade de filtragem, carga de pó e granulometria, o filtro remove maior número de particulados possível, seja qual for o tamanho.

Portanto, de acordo com Furieri e Castilho (2009), quando o dimensionamento está

adequado, conforme verificado anteriormente, o que pode causar a ineficiência são as condições de operação do equipamento.

Essas condições estão atreladas a um conjunto de fatores que exercem influência entre si, como material da manga, frequência e tipo de limpeza, manutenção (troca de peças danificadas e reparos), entre outros. O material das mangas utilizado pela Indústria de Fertilizantes X é o polipropileno. Segundo Lisboa e Schirmer (2007), esse material possui excelente resistência ácidos, álcalis, abrasão e flexão, além de suportar temperatura máxima de 93°C em condições de operação e 165° C para temperatura de fusão. Rocha (2020) comparou as características mais relevantes dos materiais, e o polipropileno se destacou por ter baixa absorção de umidade além de fibras resistentes, em relação ao nylon, acrílico, poliéster, fibra de vidro, ryton e teflon.

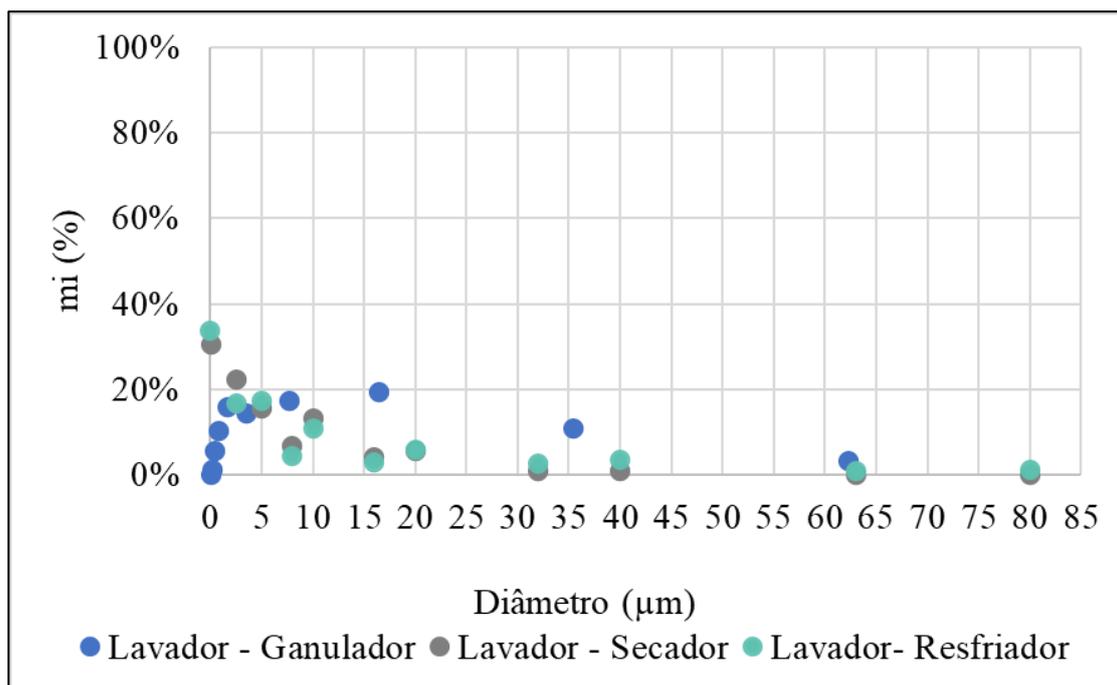
Essas referências de aplicação da manga, auxiliam na identificação do material adequado conforme as condições de operação, e como indicado na Tabela 6, os gases gerados no resfriador chegam no filtro de mangas com temperatura próxima de 50° C e umidade a 6 %, portanto, o polipropileno é apropriado para suportar todas essas características da produção dos fertilizantes.

Lisboa, Schirmer (2007) e Furieri, Castilho (2009), mencionam sobre o aumento da perda de carga devido a camada de particulado que se forma com o tempo de uso do filtro, a partir disso, fica nítido a influência que rotina de limpeza e o método escolhido exercem na eficiência. Foi dito anteriormente que a Indústria de Fertilizantes X utiliza o jato pulsante de ar comprimido para realizar essa função. Os autores relatam que, esses sistemas têm sido muito aplicados nas indústrias atualmente, pelas vantagens em relação aos demais. Requerem uma área de filtragem menor para instalação dos filtros, em comparação aos que realizam a limpeza por sacudimento mecânico ou ar reverso, possibilitando limpeza contínua e automática das mangas.

#### **4.1.3. Lavadores Venturi**

A Figura 6 ilustra o percentual de concentração das partículas que compõem o efluente gasoso da Indústria de Fertilizantes X em função do diâmetro médio apresentado anteriormente na tabela 5. Lembrando que os valores de granulometria e densidade da partícula do lavador granulador foram retirados da literatura (MEILE, 2006).

Figura 6 - Fração mássica em função do diâmetro médio dos 3 Lavadores de gases



Fonte: Do autor

Avaliando os resultados da Figura 6, tem-se que o efluente gasoso do lavador secador e resfriador venturi é constituído majoritariamente por partículas de diâmetro entre 0 e 5  $\mu\text{m}$ . Porém o cenário é diferente para as partículas do lavador granulador, justamente porque esse sistema de tratamento dos gases, não possui outro equipamento como pré coletor. A granulometria referente ao lavador – secador, corresponde aos diâmetros das partículas que não foram coletadas pelo ciclone e, do lavador – resfriador, as que não foram retidas no filtro de mangas.

Os dados de granulometria dos lavadores também foram agrupados em intervalos, para cálculo da eficiência fracionada (Tabelas 13) e posteriormente da eficiência global de coleta (Tabela 14).

Tabela 13 - Eficiência fracionada dos 3 Lavadores Venturi

Lavador	Ganulador						
Parâmetro	Faixas de diâmetro ( $d_{pi}$ )	Diâmetro médio ( $d_{pimédio}$ )*	Massa ( $m_i$ )*	Correção de Cunningham (Ch)	Impactação ( $K_i$ )	Eficiência ( $E_{ci}$ )	( $m_i$ ) x ( $E_{ci}$ )
Unidade	$\mu m$	$\mu m$	%			%	% x %
Valores Fracionados	0 a 1	0,5	17	1,42	1,72	91,30	15,80
	1 a 2	1,5	16	1,14	12,45	99,99	15,88
	2 a 5	3,5	14	1,06	63,01	100,00	14,38
	5 a 10	7,5	17	1,03	280,61	100,00	17,18
	10 a 22	16,0	19	1,01	1258,60	100,00	19,38
	> 22	22,0	14	1,01	2371,14	100,00	14,27

Lavador	Secador						
Parâmetro	Faixas de diâmetro ( $d_{pi}$ )	Diâmetro médio ( $d_{pimédio}$ )	Massa ( $m_i$ )	Correção de Cunningham (Ch)	Impactação ( $K_i$ )	Eficiência ( $E_{ci}$ )	( $m_i$ ) x ( $E_{ci}$ )
Unidade	$\mu m$	$\mu m$	%			%	% x %
Valores Fracionados	0 a 1	0,5	31	1,47	0,11	85,10	26,05
	1 a 4	2,5	22	1,09	1,99	100,00	22,17
	4 a 6	5,0	16	1,05	7,61	100,00	15,51
	6 a 10	8,0	7	1,03	19,15	100,00	6,80
	10 a 15	12,5	13	1,02	46,27	100,00	13,18
	15 a 20	17,5	4	1,01	90,21	100,00	4,10
> 20	20,0	8	1,01	117,63	100,00	7,64	

Lavador	Resfriador						
Parâmetro	Faixas de diâmetro ( $d_{pi}$ )	Diâmetro médio ( $d_{pimédio}$ )	Massa ( $m_i$ )	Correção de Cunningham (Ch)	Impactação ( $K_i$ )	Eficiência ( $E_{ci}$ )	( $m_i$ ) x ( $E_{ci}$ )
Unidade	$\mu m$	$\mu m$	%			%	% x %
Valores Fracionados	0 a 1	0,5	34	1,41	0,33	78,60	26,41
	1 a 4	2,5	17	1,08	6,31	99,90	16,78
	4 a 6	5,0	17	1,04	24,26	100,00	17,40
	6 a 10	8,0	5	1,03	61,17	100,00	4,50
	10 a 15	12,5	11	1,02	147,98	100,00	10,80
	15 a 20	17,5	3	1,01	288,68	100,00	3,00
> 20	20,0	14	1,01	376,50	100,00	14,10	

\*Dados literatura

Fonte: Do autor

Ao analisar a Tabela 13, percebe-se que a eficiência de coleta fracionária tende a aumentar com o aumento do diâmetro, assim como ocorre para o ciclone. É notório também

que a eficiência de coleta fracionária é máxima para partículas superiores a 5  $\mu\text{m}$  nos 3 lavadores, porém isso só ocorreu no ciclone para diâmetros superiores a 60  $\mu\text{m}$ ,

A eficiência total de coleta e a perda de carga obtidos para cada um dos 3 lavadores de gases estão na tabela abaixo:

Tabela 14 – Resultados dos parâmetros secundários, da eficiência total de coleta e perda de carga dos 3 lavadores venturi

Parâmetro	Unidade	Lavador - Granulador	Lavador - Secador	Lavador - Resfriador
Diâmetro da gota ( $D_g$ )	cm	0,01	0,06	0,02
Relação líquido ( $Q_l/Q_g$ )		0,002	0,008	0,003
Eficiência total de coleta ( $E_{ct}$ )	%	97	95	93
Perda de carga ( $\Delta P$ )	mmH <sub>2</sub> O	1923	6024	2772

Fonte: Do autor

As eficiências totais de coleta dos 3 equipamentos foram boas com valores entre 93% a 97 %. No experimento realizado por Meile (2006) ao testar velocidade de 4 a 10 m/s obteve eficiências globais de coleta variando de 45 a 60%, utilizando como coletor o venturi para o pó de rocha fosfática. De acordo com Lora (2002) apud Gregori (2020), dentre as variáveis já citadas, que influenciam no resultado da eficiência do venturi, as mais relevantes seriam a vazão de líquido e a velocidade do gás, pois estas estão relacionadas diretamente. Ao aumentar a velocidade do gás na garganta, ocorre um acréscimo no número de gotas devido um aumento da atomização do jato líquido injetado, elevando o contato das gotas com as partículas, e conseqüentemente da gota com a garganta do equipamento (COSTA, 2000; apud GREGORI, 2020). Portanto, como a velocidade utilizada nesse trabalho foi maior, é esperado maiores valores de eficiência também.

Na Tabela 14, pode ser observado também que o lavador - secador possui relação líquido – gás maior, e conseqüentemente apresentou maior valor de eficiência global de coleta em relação ao lavador - resfriador que possui granulometria semelhante. Conforme mencionado pelos autores Meile (2006) e Nunes (2012) a eficiência do equipamento cai para partículas inferiores a 0,5  $\mu\text{m}$ , e como foi observado na Tabela 13 o lavador – granulador, tem um percentual menor para esse diâmetro, dessa forma, ao levar em consideração a relação líquido gás o lavador – secador não consegue eficiência maior que

o lavador – granulador.

No estudo realizado por Molina (2014), foi encontrada uma eficiência média de abatimento de 80% de material particulado, para o lavador de gases que fica em série ao ciclone, para tratamento dos poluentes emitidos pela fornalha do secador de uma empresa produtora de fertilizantes. Esse estudo é extremamente análogo ao sistema do trabalho em questão, uma vez que, o mult ciclone também opera em série ao lavador – secador. E o lavador - secador da Indústria de Fertilizantes X apresentou melhor desempenho ao comparar a valor de eficiência global de coleta obtida por Molina, com valor 15% acima.

Existem diversas classificações para lavadores de gases, a seguir serão apresentadas algumas, com relação à perda de carga (GREGORI, 2020):

Tabela 15 - Classificação dos lavadores de gases em relação a perda de carga

Perda de carga ( $\Delta P$ )	Unidade	Energia
$\Delta P < 75$	mmH <sub>2</sub> O	Baixa
$75 < \Delta P < 250$	mmH <sub>2</sub> O	Média
$\Delta P > 250$	mmH <sub>2</sub> O	Alta

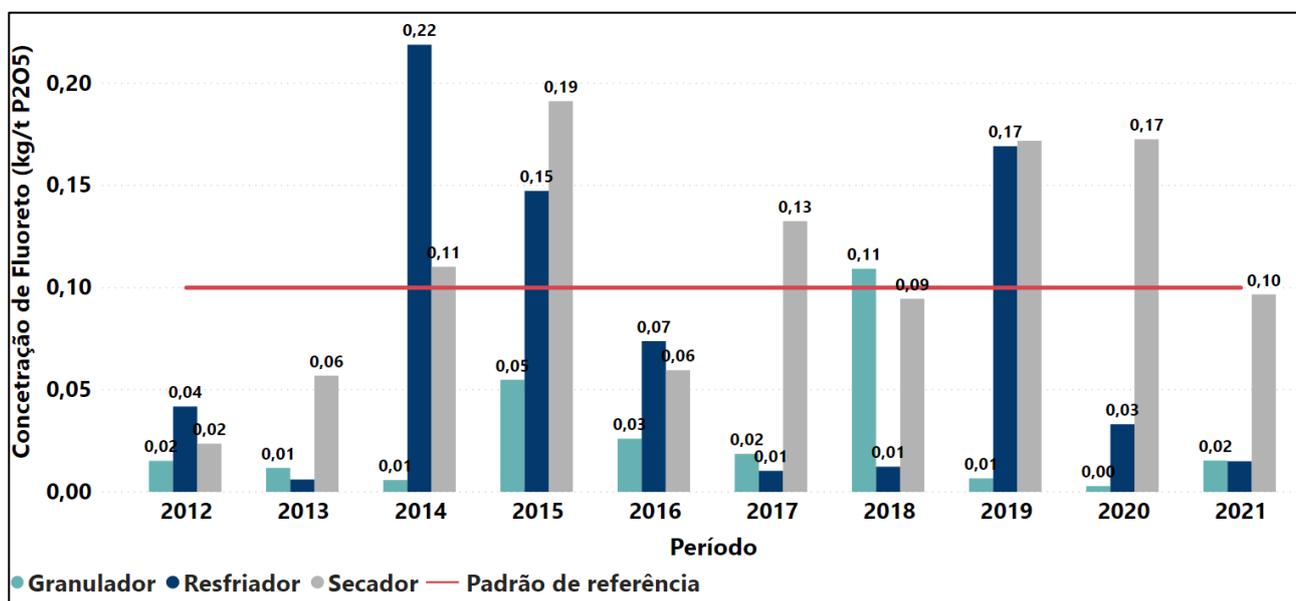
Fonte: Gregori (2020)

A eficiência também possui uma relação direta com a perda de carga. De acordo com a tabela acima os 3 lavadores em estudo podem ser classificados como equipamentos de alta energia, pois apresentaram valores de perda de carga acima de 1900 mmH<sub>2</sub>O. Segundo Gomide (1980) apud Junior (2014), espera-se uma eficiência de 99%, para os lavadores tipo venturi com perda de carga entre 250 a 750 mmH<sub>2</sub>O e velocidade entre 60 e 200 m/s. Portanto, a eficiência total de coleta é satisfatória, mas esperava-se valores ainda maiores, uma vez que a velocidade e a perda de carga estão acima. Uma sugestão para melhorar o desempenho dos equipamentos seria aumentar o n° de estágios de lavagem, ajustando a relação vazão líquido – gás, ou adequar o dimensionamento do equipamento para aumentar a velocidade na garganta.

#### 4.2. Emissões

As concentrações médias resultantes do monitoramento isocinético das fontes fixas da unidade de granulação da Indústria de Fertilizantes X realizado no período de 10 anos e o comparativo com a Resolução COPAM n°187 são apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Média anual das campanhas quadrimestrais de amostragem isocinética para fluoreto no período de 2012 a 2021.

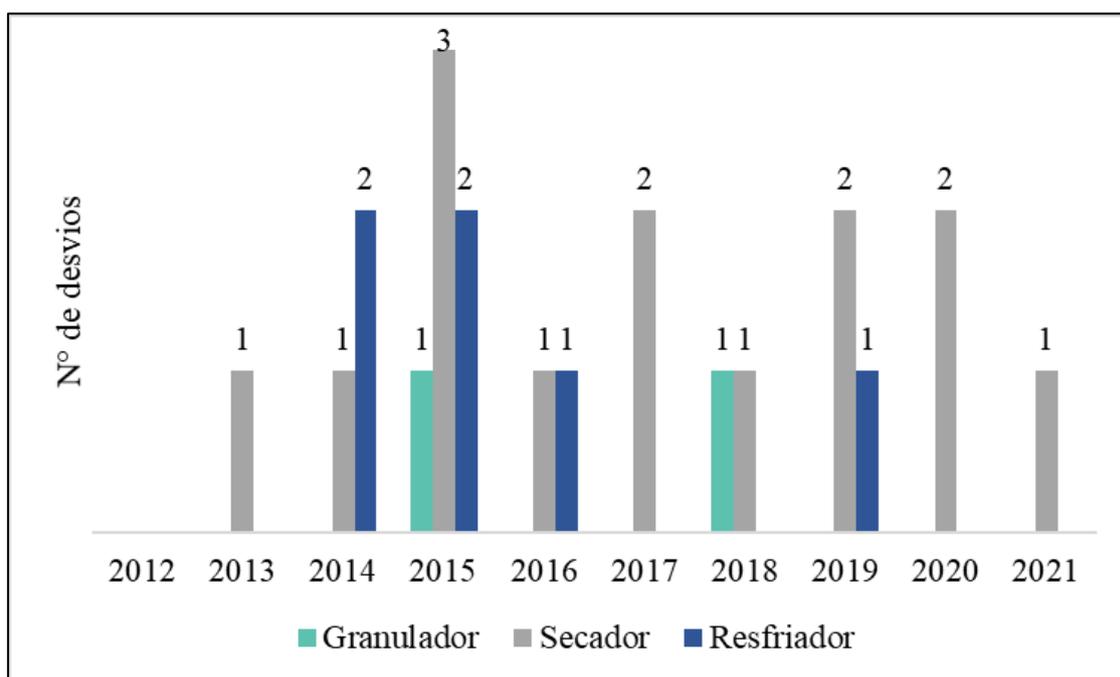


Fonte: Do autor.

Ao observar os resultados para as 3 chaminés monitoradas, é notório que a chaminé do secador teve maior nº de ultrapassagens em relação ao padrão de emissão. Ao avaliar a média anual tem-se o total de 5 ultrapassagens. Enquanto as chaminés do resfriador e granulador tiveram 3 e 1 respectivamente.

No entanto, ao verificar o nº de ultrapassagens do padrão legal por amostragem isocinética (3 campanhas anuais) Figura 8, o nº de desvios aumentam. Durante 10 anos de monitoramento, em 9 teve pelo menos 1 ultrapassagem para chaminé do secador.

Figura 8 - Número de ultrapassagens do padrão legal de emissão por campanhas quadrimestrais



Fonte: Do autor.

Essa persistência de ultrapassagens para o secador, pode corresponder justamente a emissão de partículas pequenas. Pois, segundo Lisboa e Schirmer (2007) e Rocha (2020), o ciclone possui baixa eficiência de coleta para partículas de diâmetro inferiores a 5 µm. Os valores de fração mássica na entrada do ciclone, indicam uma percentagem significativa de partículas desse tamanho (Tabela 2), sustentando essa hipótese. Além disso, o lavador venturi que faria a função de coletar as partículas menores, é conectado por vaso comunicante com o tanque do lavador - granulador, que possui o licor mais concentrado de água de recirculação para lavagem. Além disso foi verificado nas seções 4,1, e 4.1.3 que o sistema em série (ciclone -> lavador venturi) que trata esse efluente gasoso possui menor eficiência em relação aos demais com média aproximada de 86%.

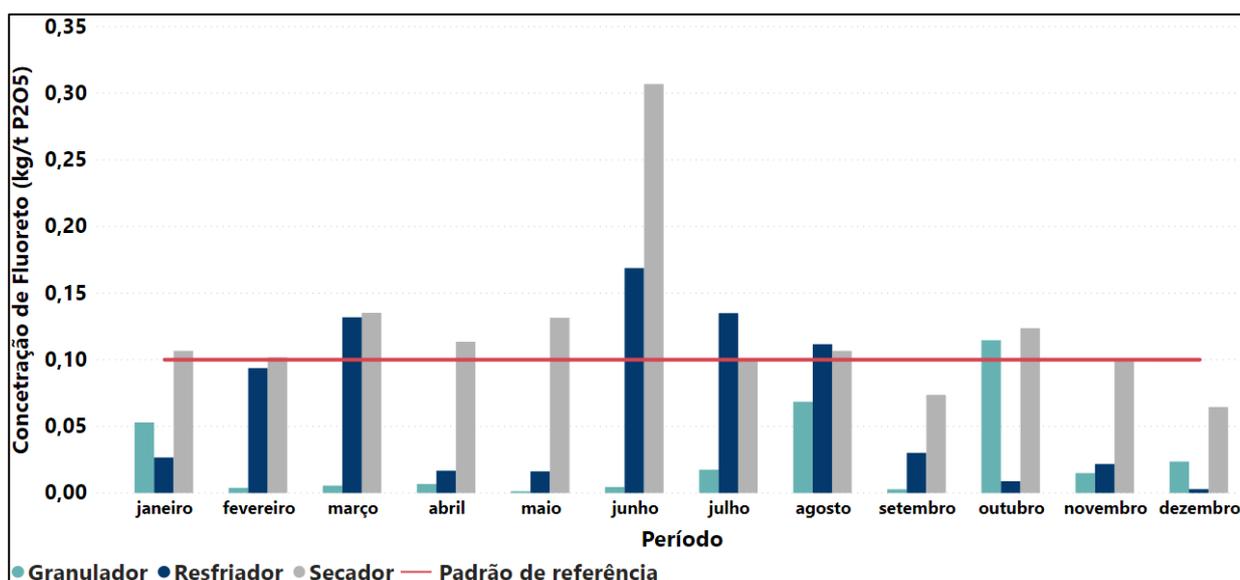
Em relação aos resultados de emissões da torre do resfriador, apesar da ocorrência de um pico em 2019, houve uma redução de ultrapassagens referente ao padrão legal a partir de 2014. De acordo com histórico de adequações dos sistemas de controle, essa melhoria se deve a troca do bico spray do lavador venturi que coleta os gases do resfriador, no início de 2018, que proporcionou melhor eficiência de lavagem, e redução da perda de carga. Além disso, no mesmo ano houve aprimoramento dos procedimentos operacionais, como acompanhamento de pressão, rotina de limpeza e medições para controle de sólidos

nos lavadores. Os valores apresentados na seção anterior, mostraram que o que o sistema em série (filtro -> lavador venturi- resfriador) responsável pelo tratamento dos gases gerados na chaminé do resfriador teve boa eficiência, com média próxima de 96%. No entanto, o bico spray tem alta probabilidade ao entupimento, o que pode ter sido um dos motivos para que a emissão em 2019 ficasse acima de 0,10 kg/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

A fim de melhorar a eficiência de lavagem dos gases do secador, em 2020 foram instalados medidores de vazão nas linhas de recirculação e, também foram substituídas as bombas para aumentar a vazão da água injetada. Isso não solucionou totalmente as ultrapassagens, mas possibilitou a redução desse número no ano seguinte.

A figura abaixo, possibilita analisar as concentrações de emissões de fluoreto nas 4 estações do ano, ao apresentar a média mensal do período em estudo.

Figura 9 - Média mensal das emissões de fluoreto do período de 2012 a 2021.

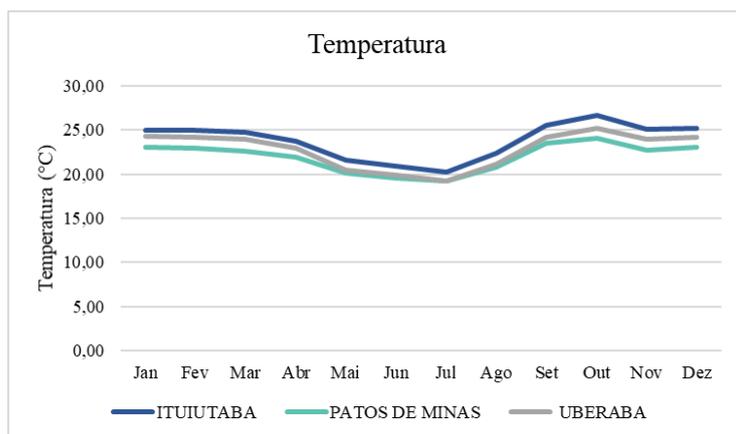


Fonte: Do autor.

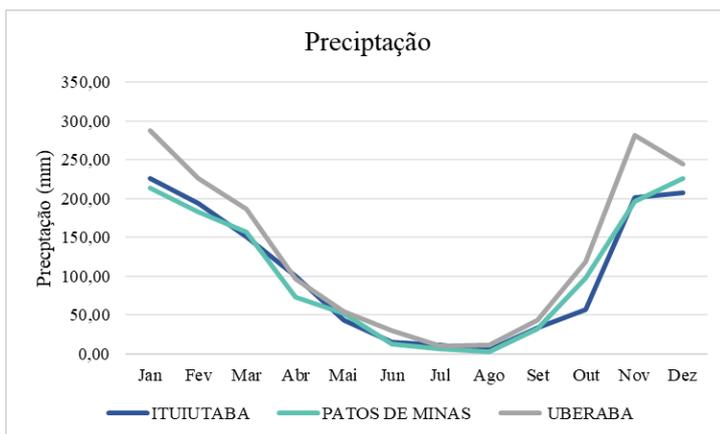
A Figura 10 apresenta as informações meteorológicas (temperatura, precipitação e vento) de 3 municípios referente ao período de 2012 a 2020, das cidades de Ituiutaba, Patos de Minas e Uberaba que compõem a Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba das estações automáticas segundo os dados do INMET.

Figura 10 - Média mensal de temperatura, precipitação e velocidade do vento das estações meteorológicas dos municípios do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba de 2012 a 2020.

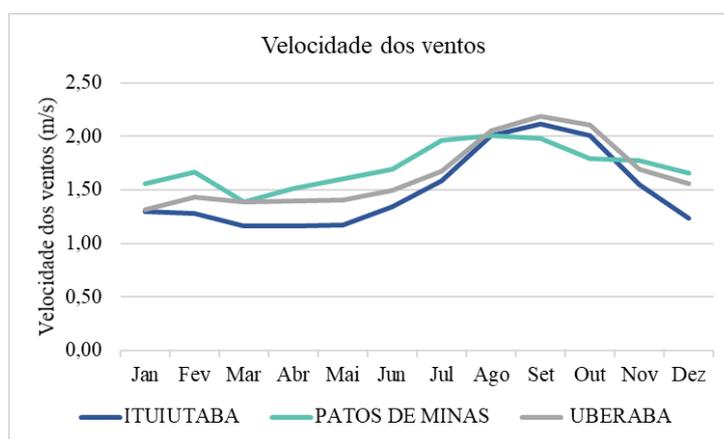
A



B



C



Fonte: Do autor segundo dados extraídos do INMET (2021)

A média mensal expressa na Figura 9, indica uma tendência de emissões acima do padrão de referência no outono e inverno. Isso é uma situação que necessita de maior atenção, tendo em vista que as condições climatológicas e pluviométricas, conforme apresentado na Figura 10 para a região de estudo, não são favoráveis no período seco. Portanto, é dificultada a principal fonte de dispersão por deposição úmida e seca, a qual remove gases, aerossóis e partículas (ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2009).

Essa situação é alarmante, pois o inverno da mesorregião é caracterizado por ter taxa de precipitação praticamente nula de acordo com os dados do INMET (Figura 10.B), sendo notável que os índices de precipitação reduzem gradativamente de março a agosto.

No processo de advecção do poluente pelo vento, a velocidade aumenta

proporcional a altura, quanto maior for a altura que o poluente estiver mais disperso será (CATALDI et al, 2000; VELEDA, 2001 apud RAMIRES, 2013). Não apenas as maiores velocidades (IZUMI, 2018), mas também as condições diurnas e noturnas favorecem a dispersão, pois durante o dia devido ao maior gradiente de temperatura gera turbulência (NÉRIS et al.,2016).

Levando esses aspectos em consideração, ao avaliar a mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, conhecida por apresentar temperaturas consideravelmente elevadas durante todo o ano, o que pode ser confirmado na Figura 10.A e que também foi observado no estudo feito por Oliveira, Faleiros e Santos (2012), com amplitude térmica de 8°, mínimas próximas de 19°C, espera-se condições favoráveis a dispersão dos poluentes.

Entretanto, a região não apresenta velocidade do vento significativas para essa função segundo Júnior, Pimentel e Landau (2010) e Nérís et al. (2016). Uma vez que a velocidade máxima chega a 2,3 m/s, considerada baixa para os autores, nos meses de agosto setembro e outubro (Figura 10.C), mesmo possuindo nesse período maior gradiente de temperatura.

### **4.3. Qualidade do ar**

As condições meteorológicas desempenham uma função determinante nas intervenções físico-químicas do transporte de poluentes entre a fonte e o receptor (GOMES, 2007). É necessário ponderar uma gama de fatores, para que seja possível concluir qualquer avaliação referente as emissões de efluentes gasosos, tendo em vista que a concentração de poluentes no ar não depende apenas da fonte onde é gerada, mas também de como incide sua difusão e remoção (INEA, 2009, apud FIGUEIREDO, 2016)

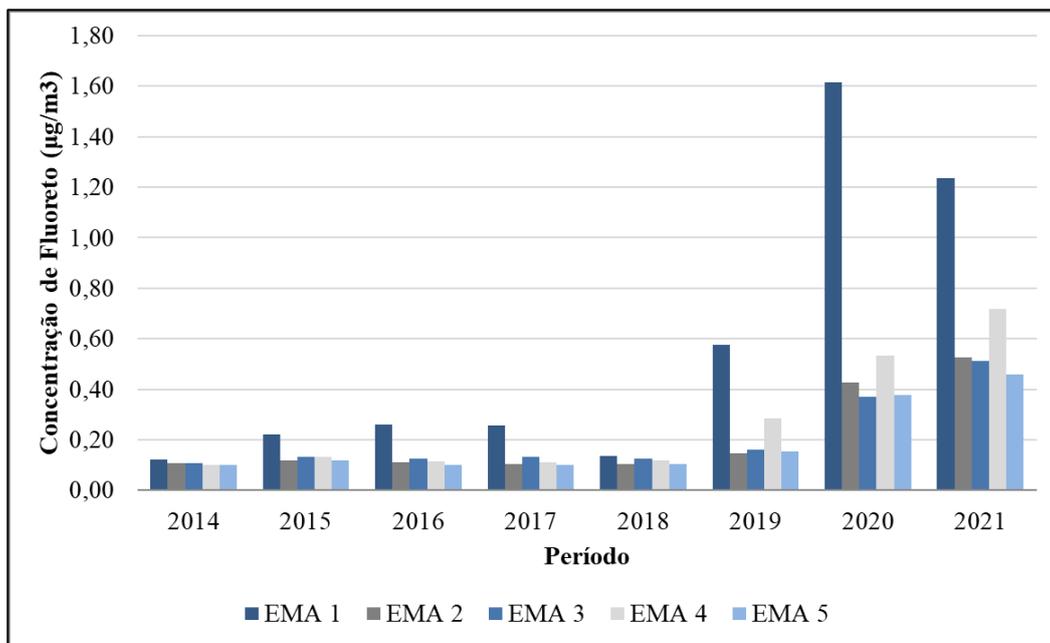
Dessa forma, os dados de qualidade do ar apresentados nas figuras abaixo (11 e 12) das estações automáticas da Indústria de Fertilizantes X, referente a média geométrica para Fluoreto e Partículas Totais em Suspensão ficaram dentro do intervalo de referência, apesar das emissões nas fontes de emissão terem ficado acima.

Conforme mencionado anteriormente, como não há padrão de qualidade do ar para fluoreto, a Indústria de Fertilizantes X segue os valores indicados no relatório do Grupo de Trabalho Federal-Provincial do governo Canadense, adotando  $2,7 \mu\text{m}^3$ .

O gráfico de Partículas Totais em Suspensão (Figura 12) inclui a parcela de fluoreto particulado, permitindo avaliar os efeitos das emissões desse parâmetro não apenas na

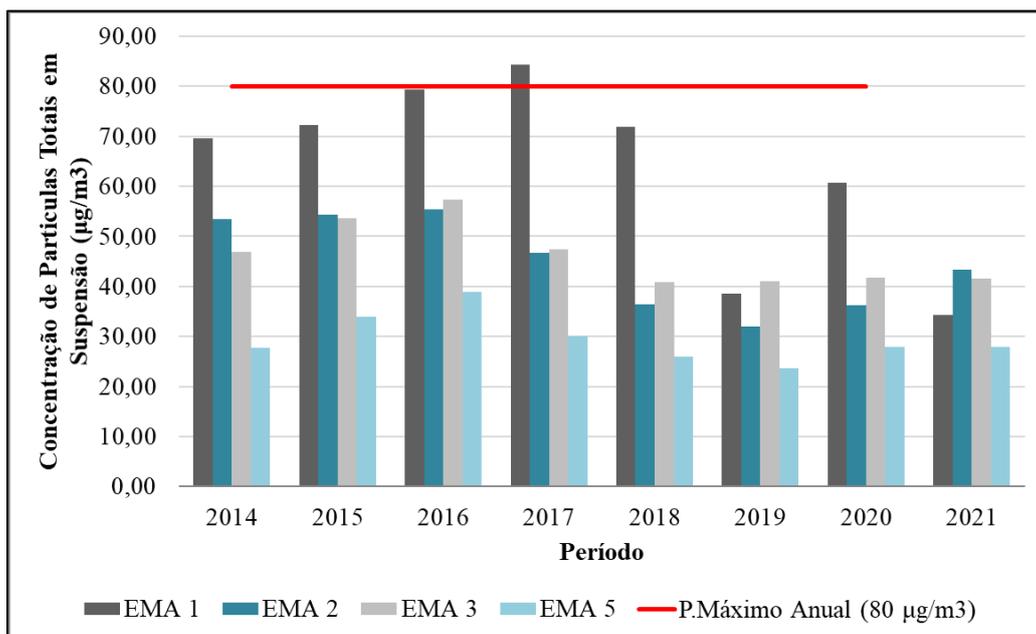
forma gasosa. Nesse gráfico não foi contemplada a Estação de Monitoramento de Qualidade do Ar 4 - EMA 4, porque o equipamento instalado nesse ponto quantifica apenas as concentrações de gases.

Figura 11 - Média geométrica de 5 estações de monitoramento de qualidade do ar, para Fluoreto, período de 2014 a 2021



Fonte: Do autor.

Figura 12 - Média geométrica de 4 estações de monitoramento de qualidade do ar para Partículas Totais em Suspensão, período de 2014 a 2021.



Fonte: Do autor.

Em ambas as Figuras (Figuras 11 e 12) pode ser observado que a estação de monitoramento denominado EMA 1, apresentou concentrações maiores, em 6 de 8 anos avaliados. E em 2017 ficou acima padrão primário 1 de Partículas Totais em Suspensão para concentração média geométrica anual de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  estabelecido pela Resolução CONAMA n° 003/1990.

No entanto, como a estação EMA 1 está localizada na área de influência industrial, como pode ser observado na Figura 4, ou seja, está na região de influência direta das fontes de emissões, e possui a finalidade de representar pontos de monitoramento que reflitam a operação da planta, assim como a EMA 2, possui uma tendência de apresentar valores altos. Uma sugestão seria enquadrar os resultados das duas estações aos padrões de referência estabelecidos para saúde ocupacional.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração, é que a ocupação em um raio de 3 km no entorno da fonte de emissões estudada, possui predominância de ocupação rural. Sendo o principal núcleo urbano próximo às fontes a cidade, que possui o centro a cerca de 6 km das fontes à nordeste (Figura 4).

Ao avaliar as Figuras 9 e 10, é notável que houve uma redução a partir de 2018 para as concentrações de Partículas Totais em Suspensão e o oposto ocorre para a concentração de Fluoreto. As melhorias realizadas pela indústria de Fertilizantes X em 2018 e 2020, provavelmente foram mais eficazes para o controle das Partículas Totais em Suspensão.

As estações EMA 5 e 3 estão localizadas para representar a exposição da população (Figura 4) as emissões dos efluentes gasosos. E como pode ser observado, tanto as concentrações de Fluoreto quanto de Partículas Totais em Suspensão, para ambas estações, tiveram médias geométricas anuais dentro do padrão de referência de qualidade do ar, com valores abaixo de  $60 \mu\text{m}^3$ .

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho propôs uma análise das emissões de poluentes em uma Indústria de Fertilizantes X do ponto de vista das técnicas de controle e monitoramento.

A análise dos resultados de eficiência dos ECPs possibilitou concluir que:

- lavador venturi - granulador: ao considerar a perda de carga o lavador ficou classificado como equipamento de alta energia, e conseqüentemente apresentou eficiência global de coleta alta (97%). Porém, deve-se levar em consideração que os

dados de granulometria utilizado para o cálculo são de literatura, e não esteja representado a real característica das partículas presentes na entrada desse equipamento;

- multiciclone e lavador venturi - secador em série: multiciclone foi classificado de acordo com sua perda de carga como um equipamento de baixa eficiência, o que condiz com os resultados obtidos de eficiência total de coleta. Entretanto, para o lavador ao considerar a perda de carga foi classificado como equipamento de alta energia, e consequentemente apresentou eficiência global de coleta alta (95%). Portanto, no geral o sistema possui eficiência mediana próxima de 86%.
- filtro de mangas e lavador venturi – resfriador em série: o filtro de mangas possui eficiência elevada (99%) e o dimensionamento está adequado para as condições de operação. E o lavador, também classificado como equipamento de alta energia, devido o resultado obtido para perda de carga, proporcionando também alta eficiência de coleta (93 %). A eficiência média do sistema de controle do resfriador é 96%.

Ao verificar os valores de emissões para os 3 processos da unidade de granulação pode-se observar que:

- chaminé granulador: ocorreu 2 ultrapassagens do padrão referência no períodos de 10 anos com amostragens quadrimestrais;
- chaminé secador: ocorreu 14 ultrapassagens do padrão referência no período de 10 anos com amostragens quadrimestrais;
- chaminé resfriador: ocorreu 6 ultrapassagens do padrão referência no período de 10 anos com amostragens quadrimestrais;

Apesar dos equipamentos apresentarem boa eficiência de coleta houve emissões acima do padrão de referência. Desse modo é preciso verificar dimensionamento e eficiência de bombas, os componentes do sistema de bombeamento como válvulas e tubulações, analisar cavitação e as alterações nas características do fluido. Além de, rever o plano de manutenção e limpeza do sistema, pois as condições de operação inadequada desses itens podem estar causando a redução pontuais do desempenho dos ECP.s.

E como as emissões ultrapassaram o padrão legal frequentemente durante o período de outono e inverno, uma maneira de amenizar essa situação é reduzir as jornadas de trabalho durante as duas estações do ano, ou pelos menos no inverno, tendo em vista que as condições meteorológicas não são favoráveis a dispersão dos poluentes atmosféricos nesse período. Porém como isso afeta as finanças da Indústria de Fertilizantes X, outra

sugestão de é aumentar em mais estágios a lavagem dos 3 venturi. E como os resultados de emissões da torre do secador se apresentou como o mais crítico, é preciso redimensionar o multiclone aumentando a velocidade e/ou número de ciclones, e aumentar a relação líquido - gás do lavador venturi. Ambos equipamentos podem estar subdimensionados para vazão que recebem.

Apesar dos resultados de emissões, o monitoramento das estações automáticas não indicaram violação dos limites de referência de qualidade do ar para os parâmetros avaliados. Mediante a esses dados, certificou-se que a saúde da população urbana mais próxima, não está sendo comprometida.

## 6. REFERÊNCIAS

ABREU, Raphael Lorenzeto de. **MinasGerais MesoTrianguloMineiroAltoParaiba.svg**. Triângulo Mineiro / Alto Paranaíba, 2006. Mapa localizador da mesorregião do Triângulo Mineiro / Alto Paranaíba de Minas Gerais. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MinasGerais\\_Meso\\_TrianguloMineiroAltoParaiba.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MinasGerais_Meso_TrianguloMineiroAltoParaiba.svg). Acesso em: 20 ago. 2021.

AFFONSO, Ariana Eliza. **Poluição atmosférica na esfera industrial**: estudo de caso em indústria de embalagens fabricadas a partir do papel reciclado. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Conformidade Ambiental) – Escola Superior da Cetesb, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/wp-content/uploads/sites/30/2018/10/Ariana-Eliza-Affonso-TCC-2018-T1.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2021.

AIRES, Marina; OLIVEIRA, Jorge Luiz Fernandes de; CASTRO JUNIOR, José Maria de. Simulação numérica do comportamento da nuvem tóxica gerada com a explosão da indústria de fertilizantes na cidade de Cubatão, estado de São Paulo, Brasil. **Raega**, ALMEIDA FILHO, Francisco de. **Monitoramento e controle de emissão de material particulado em uma fonte estacionária**. 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4010/2247.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 26 agosto. 2021.

Curitiba, v. 46, n. 2, p. 74-87, mai. 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/57789>. Acesso em: 20 fev. 2021

ASSOCIAÇÃO DOS MISTURADORES DE ADUBO DO BRASIL – AMA. Desafios do setor brasileiro de fertilizantes e as perspectivas para 2016. Disponível em: [ao-consumidor-final-total-brasil/>](#). Acesso em 26 abril. 2021.

ANDRADE, José Eduardo Pessoa de *et al.* A indústria de fertilizantes. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 1, p. 95-109, jul. 1995. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/8558/2/BS%2001%20A%20Ind%C3%BAstria%20de%20Fertilizantes\\_P\\_BD.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/8558/2/BS%2001%20A%20Ind%C3%BAstria%20de%20Fertilizantes_P_BD.pdf). Acesso em 30 mai. 2021.

BARBOSA, Davyson Demmer Guimarães; SÁ, Miller Gazolla Corrêa de. **O Complexo Químico do Triângulo Mineiro**. Minas Gerais, 04 jul. 2017, 10:31. Disponível em: <https://www.indi.mg.gov.br/o-setor-quimico-no-triangulo-mineiro/>. Acesso em: 12 nov. 2021.

BIANCHINI, Augusto et al. Theoretical model and preliminary design of an innovative wet scrubber for the separation of fine particulate matter produced by biomass combustion in small size boilers. **Biomass and bioenergy**, v. 116, p. 60-71, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953418301235>, Acesso em: 28 out, 2021.

BOURGEOU, M. *et al.* **National ambient air quality objectives for hydrogen fluoride (HF)**. 1. Science assessment document. A report by the Federal-Provincial Working Group on Air Quality Objectives and Guidelines. 1996. Disponível em: [https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/ap50\\_rio\\_tinto\\_alcan/documents/DB13.pdf](https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/ap50_rio_tinto_alcan/documents/DB13.pdf). Acesso em: 20 jun. 2021

BRAIT, Carlos Henrique Hoff. **Monitoramento ambiental de metais utilizando biomonitores e sistema passivo de coleta de poluentes**. 2008. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp086367.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2021

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Brasília: **Diário Oficial da União**, 21 nov. 2018. Disponível em: [https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603](https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603). Acesso em: 25 out. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **AGROSTAT-Estatísticas do Comércio Exterior da Brasileiro Agronegócio**: indicadores gerais Agrostat, 2021. Disponível em: <http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>. Acesso em: 23 out. 2021.

BRIGONI, S.F. 1983. **Estimativas da qualidade do ar na Cidade de Rio Grande**. Relatório Interno: Deptº. do Meio Ambiente.

BRINK, J. A.; CONTANT, C. E.. Experiments on an Industrial Venturi Scrubber. **Industrial & Engineering Chemistry**, [S.L.], v. 50, n. 8, p. 1157-1160, ago. 1958. American Chemical Society (ACS). Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie50584a035>. Acesso em: 26 mai. 2021.

CALDEIRA, Rafael da Silva. **Proposta de plano de mitigação das emissões de gases de efeito estufa na indústria gráfica**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://www.peamb.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2020/Dissert-PEAMB-2020-RAFAEL-CALDEIRA.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2021.

CAMILLO, Cíntia Moralles; SOUZA, Adriano Mendonça; RAMSER, Cláudia Aline de Souza. Variáveis climáticas relacionadas à poluição do ar e os efeitos causados à saúde humana. **Ciência e Natura**, v. 42, p. 7, dez. 2020. Disponível em:

<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/39722/html>. Acesso em: 22 jul. 2021.

Centro de Tecnologia Mineral Agrominerais para o Brasil/Eds. Francisco R. C. Fernandes, Adão B. da Luz, Zuleica C. Castilhos. - Rio de Janeiro: **CETEM/MCT**, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/917/1/cap6.pdf>. Acesso em 10 out. 2021.

CESCANI, Victor Kovaski; SIQUEIRA, Tiago de Abreu. Demonstração do modelo de pluma gaussiana para utilização em controle de poluentes atmosféricos. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 10., 2016, Porto Alegre. [Anais]. Rio Grande do Sul, RS: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul-PUCRS, 2016. Disponível em: [http://www.abesrs.uni5.net/centraldeeventos/\\_arqTrabalhos/trab\\_2016091215134200000801.pdf](http://www.abesrs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_2016091215134200000801.pdf). Acesso em: 12 jun. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Série histórica de produção no Brasil por unidades da Federação. Brasília**, 2016. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>>. Acesso em: 28 abril. 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ficha de Informação Toxicológica:** flúor e fluoretos. CETESB: 2014a; 3p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/FI%C3%BAor-e-fluoretos.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2021.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Pib do agronegócio alcança participação de 26,6% no pib brasileiro em 2020. **CNA:** 2021. Disponível em: [https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea\\_CNA\\_relatorio\\_2020.pdf](https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_CNA_relatorio_2020.pdf). Acesso em: 20 out. 2021.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Panorama do Agro**, jun. 2020. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso em: 26 out. 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – MINAS GERAIS. **Perfil da Indústria nos Estados.** Disponível em: <https://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/estado/mg>. Acesso em: 10 nov. 2021.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. Deliberação normativa COPAM n. 187, de 19 de setembro de 2013. Estabelece condições e limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, 20 set. 2013. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=258656>. Acesso em: 10 ago. 2021.

CAPANA, Giulliano Humberto. **Estudo do impacto do enxofre presente no diesel na emissão de poluentes e em tecnologia de pós tratamento de gases de escape.** 2008. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.automotiva-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2009/03/Capana-Giulliano-Humberto.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

CHAGAS, Nadia Jamaica *et al.* Padrão locacional das indústrias de fertilizantes na região do Triângulo Mineiro: uma análise do município de Uberaba (MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, 7., 2014, Vitória. **Anais** [...]. Vitória: 2014. p. 1-12. Disponível em: [http://www.cbg2014.agb.org.br/resources/anais/1/1404316955\\_ARQUIVO\\_textocompletoENG201430junhonadiajamaicachagas.pdf](http://www.cbg2014.agb.org.br/resources/anais/1/1404316955_ARQUIVO_textocompletoENG201430junhonadiajamaicachagas.pdf). Acesso em: 10 jun. 2021.

CHAMBERLAIN, Isabella Mendes de Matos. **Análise acerca de denúncias de poluição do ar nas proximidades da companhia siderúrgica nacional**. 2021. Monografia (Curso de Geografia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021. Disponível em: [https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/23035/1/TCC%20\\_Isabella%20Chamberlain.pdf](https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/23035/1/TCC%20_Isabella%20Chamberlain.pdf). Acesso em: 14 ago. 2021.

CHANG, Kindlly Miranda. **Gestão ambiental na indústria de fertilizantes: diagnóstico inicial dos resíduos**. 2017. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20597/5/Gestaoambientalna.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2021.

CHIABAI JUNIOR, João. **Avaliação do desempenho de um ciclone stairmand adaptado com bicos injetores de água**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4144/6116.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 mar. 2021

CRUZ, André Camargo; PEREIRA, Felipe dos Santos; FIGUEIREDO, Vinicius Samu de. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 45, p. 137-187, mar. 2017. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/11814/1/BS%2045%20Fertilizantes%20organominerais%20de%20res%20c3%a9duos%20%5b...%5d\\_P\\_BD.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/11814/1/BS%2045%20Fertilizantes%20organominerais%20de%20res%20c3%a9duos%20%5b...%5d_P_BD.pdf). Acesso em: 09 abr. 2021.

DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. Poluição do ar como causa de morbidade e mortalidade da população urbana. **Raega**, Curitiba, n. 15, p. 113-126, 2008. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/14249/9575>. Acesso em: 10 jun. 2021.

DERISIO, José Carlos. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 5. Ed atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. *E-book*.

DI NATALE, Francesco et al. Purificador Venturi assistido por crescimento condensacional para controle de emissões de partículas de fuligem. **Fuel Processing Technology**, v. 175, p. 76-89, 2018.

DIAS, E. G.; LAJOLO, R. D. O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no Brasil. In: Agrominerais para o Brasil. Rio de Janeiro: **CETEM/MCT**, 2010. Cap.6, p.105-124. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/917/1/cap6.pdf>. Acesso em: 21 out. 2021.

DIAS, Maria Assunção Faus da Silva. Efeito estufa e mudanças climáticas regionais. **Revista USP**, n. 71, p. 44-51, nov. 2006. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13550/15368>. Acesso em: 10 jun. 2021.

DRUMM, Fernanda Caroline et al. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 66-78, abr. 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/270299811.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília: Embrapa, 2018. 212 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030++o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829?version=1.1>. Acesso em: 10 abr. 2021.

ESTADOS UNIDOS. **Department of Agriculture**. Agricultural Marketing Service. United sorghum checkoff program. 2018 a. Disponível em: <<https://www.usa.gov/federal-agencies/u-s-department-of-agriculture>>. Acesso em: 18 maio. 2021.

FERNANDES, Paulo Sérgio. **Gestão de Fontes Estacionárias de Poluição Atmosférica**. 2003.

FERREIRA, João Vitor Apolinário. **Lavadores de gases nas indústrias: uma breve revisão sobre os impactos da sua utilização no controle da poluição atmosférica, atendimento a legislação ambiental e saúde humana**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23377/1/lavadoresgasesindustriabrevevisao.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2021.

FIGUEIREDO, Isabel Peralva. **Avaliação de emissões atmosféricas na indústria siderúrgica sob a ótica do controle e monitoramento: o caso da CSN**. 2016. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10017105.pdf>. Acesso em: 19 set. 2021.

FONSECA, Roney José da. **Monitoramento e avaliação da emissão de dutos e fontes estacionárias de indústrias cerâmicas por meio de método potencio métrico e fluorescência de raios X**. 2007. Dissertação (Mestrado Saneamento e Meio Ambiente) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

FRANCO, Camila. **A expansão das florestas plantadas no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2020. Disponível em: [http://clyde.dr.ufu.br/bitstream/123456789/29414/1/Dissertacao\\_Camila\\_Franco\\_.pdf](http://clyde.dr.ufu.br/bitstream/123456789/29414/1/Dissertacao_Camila_Franco_.pdf). Acesso em: 27 set. 2021.

GALVÃO FILHO, J. B. Poluição do ar. In: Margulis, S (Ed). **Meio ambiente: aspectos técnicos e econômicos**. 2.ed. Brasília: IPEA, 1996. Cap 2, p.35-55 Disponível em: <https://www.consultoriaambiental.com.br/pdf/pdf-35.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

GARCIA, Marina Reback D. *et al.* Influência das fábricas de fertilizantes na composição das águas da chuva e subterrânea (Rio Grande, RS). **Notas Téc. Facimar**, n. 4, p. 29-35, 2000. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/2003/influ%20das%20f%20a%20bricas.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 set. 2021.

GIODA, Adriana; AQUINO NETO, Francisco Radler de. Considerações sobre estudos de ambientes industriais e não industriais no Brasil: uma abordagem comparativa. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 19, p. 1389-1397, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/7RJnMJHJkzD6FZyhpNdR8jC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 7 set. 2021

GOMES, Danielle Alves de Novaes. **Quantificação e análise das emissões de gases de efeito estufa na indústria siderúrgica**. 2020. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2020. Disponível em: <http://pgta.uff.br/wp-content/uploads/sites/249/2021/02/PGTA-057.Danielle-Alves-de-Novaes-Gomes.pdf>. Acesso em: 10 de out. 2021.

GOMES, Valério de Araújo. **Modelagem e simulação da dispersão das emissões de fluoreto gasoso de uma redução eletrolítica de alumínio**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/303/3/VAL%20E%20ARA%20GOMES%20DISSERTA%20PPGEQ%202007.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2021

GONÇALVES, José Antônio Silveira. **Aspectos da modelagem matemática de lavadores Venturi**. 2000. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

GREGORI, Rodolfo. **Avaliação da perda de carga em um lavador Venturi de seção circular**. 2020. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/13636/Rodolfo%20-%20TCC-Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 ago. 2021.

HOFMEISTER, Vera Anna. **Efeitos da poluição do ar sobre a função pulmonar: um estudo de coorte em crianças de Cubatão**. 1991. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-09012018-160805/publico/DR\\_199\\_Hofmeister\\_1991.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-09012018-160805/publico/DR_199_Hofmeister_1991.pdf). Acesso em: 10 de out. 2021.

HÜTTNER, Maura Dumont; MOREIRA, José da Silva. Avaliação ambiental e epidemiológica do trabalhador da indústria de fertilizantes de Rio Grande, RS. **Jornal de Pneumologia**, v. 26, n. 5, p. 245-253, set. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jpneu/a/5TgD3PhSbCgS7S3GwntL56m/?lang=pt>. Acesso em:

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Concla**: Comissão nacional de classificação. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/en/component/content/article/97-7a12/7a12-voce-sabia/curiosidades/1628-populacao-mundial-no-seculo->



jan. 2007. Disponível em:  
[http://www.pvb.com.br/portal/download\\_artigo/MjkyfDIwMjExMTE2MDgxOTAy](http://www.pvb.com.br/portal/download_artigo/MjkyfDIwMjExMTE2MDgxOTAy).  
Acesso em: 10 nov. 2021.

MARQUES, Henrique Gonçalves *et al.* **Flúor, benéfico ou maléfico?**. 2015. Projeto de Qualificação (Curso Técnico em Química Integrado ao Ensino Médio) – Instituto Federal Catarinense, Araquari, 2015. Disponível em: <https://quimica.arauari.ifc.edu.br/wp-content/uploads/sites/20/2018/12/TRABALHO-FINAL-FLUOR-BENEF%C3%8DCIO-OU-MALEF%C3%8DCIO.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2021.

MEDEIROS, Larissa Cavalcanti de Sousa. **Monitoramento de material particulado atmosférico no centro da cidade de João Pessoa-PB**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020. Disponível em: [https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/18427/1/LarissaCavalcantiDeSousaMedeiros\\_Dissert.pdf](https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/18427/1/LarissaCavalcantiDeSousaMedeiros_Dissert.pdf). Acesso em: 10 out. 2021.

MEILI, Lucas. **Estudo do desempenho de lavadores de gases do tipo venturi com seção circular**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15211/1/LMeiliDISSPRT.pdf>. Acesso em: 12 set. 2021.

MELO, Samara Cristina Oliveira. **Atividade econômica, produção de energia e as emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2019. Dissertação (Mestrado em Economia) – Faculdade de Economia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: [http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/47154/1/2019\\_dis\\_scomelo.pdf](http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/47154/1/2019_dis_scomelo.pdf). Acesso em: 20 mai. 2021.

MIGLIAVACCA, Daniela Montanari. **Estudo dos processos de remoção de poluentes atmosféricos e utilização de bioindicadores na região metropolitana de Porto Alegre, RS**. 2009. Tese (Doutorado em Ciências com ênfase em Ecologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17052/000696292.pdf?sequence=1&isAllo wed=y>. Acesso em: 15 out. 2021.

MOLINA, Ítalo Roque Chanes. **Operacionalização de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) por meio da aplicação do Programa de Qualidade Ambiental (PQA): estudo de caso em uma empresa produtora de fertilizantes**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014. Disponível em: [http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11981/2/LD\\_COEAM\\_2013\\_2\\_11.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11981/2/LD_COEAM_2013_2_11.pdf). Acesso em: 08 out. 2021.

MOREIRA, Lenice Carrilho de Oliveira. Comparação entre os poluentes atmosféricos emitidos por uma caldeira flamotubular movida a gás natural e a óleo combustível BPF 2A. **Interações**, Campo Grande, v. 13, n. 1, p. 49-57, jan-jun. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/inter/a/nrFrp6Lr9nT4fgqkQW9cJQc/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 09 nov. 2021.

NODARI, Amaranta Sant'ana; SALDANHA, Claudinéia Brazil. análise das condições meteorológicas durante episódios críticos de poluição atmosférica no município de Porto Alegre/RS In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 10., 2016, Porto Alegre. [Anais]. Rio Grande do Sul, RS: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul-PUCRS, 2016. Disponível em: [http://www.abesrs.uni5.net/centraldeeventos/\\_arqTrabalhos/trab\\_2016091011370200000650.pdf](http://www.abesrs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_2016091011370200000650.pdf). Acesso em: 12 jun. 2021.

NUNES, L.A.L. 1979. Relatório preliminar do impacto sobre a qualidade do solo, fauna e flora relativo à implantação do distrito industrial de Rio Grande. Relatório Interno: Deptº. do Meio Ambiente, Porto Alegre.

NUNES, Wladimir José. **Avaliação da eficiência dos sistemas de tratamento das emissões atmosféricas no processo de atomização de massa cerâmica.** 2011. Trabalho de Conclusão (Especialização em Perícia e Auditoria Ambiental) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/1031/1/Wladimir%20Jos%C3%A9%20Nunes.pdf> Acesso em 19 set. 2021.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco de; PIMENTEL, Luiz Cláudio Gomes; LANDAU, Luiz. Critérios de estabilidade atmosférica para a região da central nuclear almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis – RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 270-285, jun. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/tXznnQDFSLnB6zR3py5K8sr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 out. 2021.

OLIVEIRA, Luiz Antonio de; FALEIROS, Fernanda Endo; SANTOS, Juliana Andrade Silva dos. Análise do condicionamento da altitude nas variáveis climáticas de temperatura e precipitação na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 1, n. 5, p. 325-335, 2012. Disponível em: <https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2361/2190>. Acesso em: 15 ago. 2021.

OTTO, Rafael, et al. Rendimento da cana-de-açúcar é afetado por flúor. **Bragantia**, v. 66, n. 3, p. 505-509, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/Gk3rJV4WGzkqxSkmZrr6kNs/?lang=pt>. Acesso em: 18 out. 2021.

PEREIRA, Tássia Nunes Dias. **Análise do conteúdo energético, de gases de efeito estufa e de água do comércio internacional brasileiro.** 2020. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: [http://www.ppe.ufrj.br/images/T%C3%A1ssia\\_Nunes.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/T%C3%A1ssia_Nunes.pdf). Acesso em: 18 out. 2021.

POLI, Maria Cristina. **Emissões de flúor nas indústrias de pisos cerâmicos dos municípios de Cordeirópolis e Santa Gertrudes situações e recomendações.** Curso de Especialização Gestão Ambiental – Universidade Estadual de Campinas, 2002. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/wp-content/uploads/sites/30/2016/06/Maria\\_Cristina\\_Poli.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/wp-content/uploads/sites/30/2016/06/Maria_Cristina_Poli.pdf). Acesso em: 14 nov. 2021.

RAMIRES, Letícia Ogushi Romeiro. **Análise da fonte e composição da poluição atmosférica em diferentes locais da região metropolitana de São Paulo**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/5/5160/tde-27032013-094910/publico/LeticiaOgushiRomeiroRamires.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2021.

RIET-CORREA, Franklin et al. Poluição industrial como causa de intoxicação por flúor em bovinos no município de Rio Grande, RS. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 4, p. 107-114, dez. 1983. Disponível em: [http://www.pvb.com.br/portal/download\\_artigo/MzEzOHwyMDIxMTEwNjA4MDA0Mw==](http://www.pvb.com.br/portal/download_artigo/MzEzOHwyMDIxMTEwNjA4MDA0Mw==). Acesso em: 05 nov. 2021.

ROCHA, Julio Cesar; ROSA, André Henrique; CARDOSO, Arnaldo Alves. **Introdução à química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

RODRIGUES, Rafael Branco *et al.* Opção de troca de produto na indústria de fertilizantes. **Revista de Administração**, São Paulo, v.50, n.2, p.129-140, abr./maio/jun. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rausp/v50n2/0080-2107-rausp-50-02-0129.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2021.

SANTOS, Maria Rejane Farias dos. **Padrões da qualidade do ar durante a paralisação nacional dos caminhoneiros no ano de 2018, no município de Canoas-RS**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/217488/001121550.pdf?sequence=1&isAlloved=y>. Acesso em: 10 set. 2021.

SANTOS, Thereza Christina Carvalho; CÂMARA, João Batista Drummond. *Geo Brasil 2002: perspectivas do meio ambiente no Brasil*. Brasília, DF: IBAMA, 2002., 2002

SCHWARTZAUPT, Bianca; TRINDADE, Tamara Vigolo. Inventário de emissões de gases de efeito estufa em uma indústria de fertilizantes. **Memorial Tcc: Caderno da Graduação**, v. 2, n. 1, p. 151-164, jan. 2016. Disponível em: <https://memorialtcccadernograduacao.fae.edu/cadernotcc/article/view/141/42>. Acesso em: 10 set. 2021.

SILVA, Bruno Menezes da. **Avaliação de um lavador Venturi na coleta de material particulado fino emitido pela queima de biomassa**. 2020. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/214014>. Acesso em: 12 set. 2021.

SILVA, Maria da Conceição Monteiro Patrício. **Desenvolvimento de ferramentas interactivas para divulgação das aplicações da biotecnologia ambiental em biorremediação**. 2006. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Faculdade de Engenharia dos Recursos Naturais, Universidade do Algarve, Faro, 2006. Disponível em: [https://sapientia.ualg.pt/bitstream/10400.1/14813/1/S14\\_SILVA--Desenvolvimento\\_de\\_ferramentas\\_interactivas.pdf](https://sapientia.ualg.pt/bitstream/10400.1/14813/1/S14_SILVA--Desenvolvimento_de_ferramentas_interactivas.pdf). Acesso em: 12 set. 2021.

SILVA, Mariana Império Meyrelles Thomaz da. **Nexo entre poluição atmosférica de impacto local e mudanças climáticas globais em um modelo de avaliação integrada para o Brasil**. 2020. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: [http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Tese\\_MarianaImp%C3%A9rio.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Tese_MarianaImp%C3%A9rio.pdf). Acesso em: 20 out. 2021.

UNEP - United Nations Environment Program; UNIDO – United Nations Industrial Development Organization; IFA - International Fertilizer Industry Association (1998). Mineral fertilizer production and the environment. Part 1. **The fertilizer industry's manufacturing process and environmental issues**. United Nations Publication [ISBN: 92-807-1640-9] Disponível em <<http://www.fertilizer.org/ifa/Home-Page/LIBRARY/Books-selection/>>. Acesso 20 mar. 2021.

U.S. Geological Survey, 2017, **Mineral commodity summaries 2017**. U.S. Geological Survey. Janeiro, 2017. 202 p. Disponível em:<<https://doi.org/10.3133/70180197>>.

VIEIRA, Neise Ribeiro. **Poluição do ar**: indicadores ambientais. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2009.

XAVIER, Maria Emília Rehder; KERR, Américo Sansigolo. A análise do efeito estufa em textos paradidáticos e periódicos jornalísticos. **Caderno Brasileiro de ensino de Física**, v. 21, n. 3, p. 325-349, dez. 2004. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6423/5939>. Acesso em: 11 nov. 2021.

ZAMBERLAN, Carlos Otávio; ABREU, Rudnei Johann de; AZAMBUJA, Victor Gama. Criação de instrumento de mensuração da satisfação do cliente para fertilizantes de solo. **Revista do Cepe**, n. 46, p. 91- 109, jul-dez. 2017. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/cepe/article/view/9890>. Acesso em: 20 mai. 2021.

