



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

ISABEL GOMES SILVA

**AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NA ÁREA DO COMPLEXO
INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM, CEARÁ, BRASIL**

FORTALEZA
2023

ISABEL GOMES SILVA

**AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NA ÁREA DO COMPLEXO
INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM, CEARÁ, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo.

Coorientadora: Profa. Dra. Adriana Guimarães Costa.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S586a Silva, Isael Gomes.
Avaliação da poluição atmosférica na área do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará, Brasil / Isael Gomes Silva. - 2023.
69 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo.
Coorientação: Profa. Dra. Adriana Guimarães Costa.
1. Poluição atmosférica. 2. Monitoramento. 3. Qualidade do ar. 4. Área industrial. I. Título.
CDD 628
-



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.017364/2023-27

Interessado: Coordenadoria do Curso de Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental
(PGTGA) - Campus Fortaleza

ISABEL GOMES SILVA

“AVALIAÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NA ÁREA DO COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM, CEARÁ, BRASIL”

*Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do
Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.
Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.*

Aprovada em: 08/12/2023

Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Documento assinado digitalmente
RINALDO DOS SANTOS ARAUJO
Data: 17/12/2023 09:56:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Francisco Sales Ávila Cavalcante

Universidade Estadual do Ceará - UECE

Assinado de forma digital por
FRANCISCO SALES AVILA
CAVALCANTE:443177863
20
CAVALCANTE:44317786320
Dados: 2023.12.13 14:03:38
-03'00'



Documento assinado digitalmente
REINALDO FONTES CAVALCANTE
Data: 12/12/2023 20:51:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Reinaldo Fontes Cavalcante

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE *Campus Quixadá*

A Deus.

Aos meus pais.

A minha família

Aos mestres.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela concepção, pela inteligência e discernimento nos planos da vida.

A meus pais Ismael e Odete por acreditar que o estudo e o conhecimento sempre libertam e ascendem.

A meus irmãos e irmãs: Raimundo, Ismael, Jacy, Ise, Ilse, Ilma, Ilna, Iara e Isabel pelo incentivo constante.

A minha esposa Francinete e a minha filha Isadora pela solidariedade e paciência nos momentos de maior concentração.

Ao Prof. Dr. Rinaldo Araújo pelo seu grande conhecimento, pela sua capacidade de orientação justa, firme e direcionada, por sua paciência e respeito.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental que contribuíram com minha formação através de suas aulas e recomendações.

Aos colegas de curso: Jackson, Gurgel, Raulino, Karol, Adriano e Suely pelo encorajamento mútuo e a amiga Rovênia pela indicação do Programa de Pós-Graduação.

A Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) pela disponibilização dos dados usados neste trabalho e pela minha liberação para participar deste mestrado.

"Somos apenas uma estirpe avançada de macacos em um planeta menor de uma estrela muito comum. Mas podemos entender o universo. Isto nos torna muito especiais".

Stephen Hawking.

RESUMO

A indústria siderúrgica é um importante setor de demanda global de energia final e se apresenta como responsável por grandes emissões de CO₂, materiais particulados, gases inorgânicos e compostos orgânicos voláteis. No estado do Ceará, particularmente nos municípios de Maracanaú, São Gonçalo do Amarante e Caucaia se localizam as principais áreas industriais do estado e nestas cidades as ações de controle e monitoramento da qualidade do ar são ainda incipientes. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo monitorar as emissões atmosféricas e avaliar a qualidade do ar na área sob influência de um complexo industrial na cidade de Pecém, São Gonçalo do Amarante, Ceará, durante o ano de 2022. As amostragens de PTS, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ e NO₂ foram realizadas nos sítios de Bolso, Matões, Parada, Paul, Pecém Pousada e Pecém Lagoa situados no entorno do complexo industrial usando amostradores semiautomáticos de grande e pequeno volumes. Em geral, os resultados encontrados para todos os poluentes investigados, independente da estação climática, mostraram concentrações médias inferiores aos padrões vigentes estabelecidos pelo Conselho Nacional do meio Ambiente, caracterizando a boa qualidade do ar nas áreas sob investigação. Por outro lado, nas comunidades de Bolso, Matões, Parada e Paul foram verificadas no período seco frequências de ultrapassagens entre 10% e 25% das concentrações dos materiais particulados inaláveis finos (PM_{2.5}) em relação ao valor limite atual da Organização Mundial de Saúde, o que sugere uma estratégia específica de monitoramento e controle para este poluente visando o bem-estar e a saúde das populações que vivem nestas localidades.

Palavras-chave: Poluição atmosférica. Monitoramento. Qualidade do ar. Área industrial.

ABSTRACT

The steel industry is an important sector of global final energy demand and is responsible for large emissions of CO₂, particulate materials, inorganic gases, and volatile organic compounds. In particular, the main industrial areas of the state are in the municipalities of Maracanaú, São Gonçalo do Amarante and Caucaia and in these cities, actions to control and monitor air quality are still incipient. In this context, the present study aims to monitor atmospheric emissions and evaluate air quality in the area under the influence of an industrial complex in the city of Pecém, São Gonçalo do Amarante, Ceará, during the year 2022. Sampling of PTS, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ and NO₂ was carried out at the sites of Bolso, Matões, Parada, Paul, Pecém Pousada and Pecém Lagoa located around the industrial complex using large and small volume semi-automatic samplers. In general, the results found for all pollutants investigated, regardless of the climate season, showed average concentrations lower than the current standards established by the National Environmental Council, characterizing good air quality in the areas under investigation. On the other hand, in the communities of Bolso, Matões, Parada and Paul, frequencies of 10% to 25% of concentrations of fine inhalable particulate matter (PM_{2.5}) were observed in the dry period compared to the current guide value of the World Health Organization. Health, which suggests a specific monitoring and control strategy for this pollutant aiming at the well-being and health of populations living in these urban sites.

Keywords: Air pollution. Monitoring. Air quality. Industrial area.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	— Equipamentos utilizados no monitoramento da qualidade do ar.....	35
Figura 2	— Localização das estações de monitoramento.....	36
Figura 3	— Localização das fontes de emissões fixa na área do complexo industrial em estudo.....	37
Figura 4	— Rosa dos ventos no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área em estudo.....	43
Figura 5	— Rosa dos ventos no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área em estudo.....	43
Figura 6	— Distribuição de frequências da velocidade dos ventos no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área em estudo.....	44
Figura 7	— Distribuição de frequências da velocidade dos ventos no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área em estudo.....	44
Figura 8	— Rosa dos ventos localizadas nos pontos de amostragem da área de estudo no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa).....	45
Figura 9	— Rosa dos ventos localizadas nos pontos de amostragem da área de estudo no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca).....	45
Figura 10	— Concentrações de PTS (24 h) nos diferentes pontos de monitoramento da qualidade do ar no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo.....	48
Figura 11	— Concentrações de PTS (24 h) nos diferentes pontos de monitoramento da qualidade do ar no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo.....	49
Figura 12	— Concentrações de PM ₁₀ (24 h) nos diferentes pontos de monitoramento da qualidade do ar no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo.....	51
Figura 13	— Concentrações de PM ₁₀ (24 h) nos diferentes pontos de monitoramento da qualidade do ar no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo.....	52
Figura 14	— Concentrações de PM _{2.5} das amostragens da rede de monitoramento da qualidade do ar no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa).....	55
Figura 15	— Concentrações de PM _{2.5} das amostragens da rede de monitoramento da qualidade do ar no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca).....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos gerados em indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas.....	28
Tabela 2	— Padrões de qualidade do ar vigentes no Brasil.....	29
Tabela 3	— Padrões de qualidade do ar adotados pela USEPA.....	31
Tabela 4	— Valores de referência adotados pela União Europeia.....	32
Tabela 5	— Valores-guia de qualidade do ar da Organização Mundial de Saúde.....	33
Tabela 6	— Parâmetros meteorológicos estação chuvosa na área em estudo.....	40
Tabela 7	— Parâmetros meteorológicos da estação seca na área em estudo.....	40
Tabela 8	— Normais climatológicas para as cidades de São Gonçalo do Amarante e Fortaleza.....	41
Tabela 9	— Estatísticas do monitoramento de PTS (24 h) no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo.....	47
Tabela 10	— Estatísticas do monitoramento de PTS (24 h) no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo.....	47
Tabela 11	— Estatísticas do monitoramento de PM ₁₀ (24 h) no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo.....	50
Tabela 12	— Concentrações de PM ₁₀ das amostragens da rede de monitoramento da qualidade do ar no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca).....	50
Tabela 13	— Estatísticas do monitoramento de PM _{2.5} (24 h) no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo.....	53
Tabela 14	— Estatísticas do monitoramento de PM _{2.5} (24 h) no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo.....	54
Tabela 15	— Estatísticas do monitoramento de SO ₂ e NO ₂ (24 h) no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo.....	59
Tabela 16	— Estatísticas do monitoramento de SO ₂ e NO ₂ (24 h) no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo...	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EEA	Agência Europeia do Ambiente
BFG	Gás de Alto forno
BOF	Forno Básico de Oxigênio
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
COG	Gás de Coqueria
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP	Conferência das Partes
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
GWP	Potencial de Aquecimento Global
HAP	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
LDG	Gás de aciaria
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
OPAS	Organização Pan-Americana de Saúde
PCB	Bifenilas Policloradas
PCDD/F	Dibenzo-p-Dioxinas Policloradas e Dibenzofuranos Policlorados
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará
UN	Nações Unidas
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA
WHO	Organização Mundial da Saúde

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivo geral.....	17
2.2	Objetivos específicos.....	17
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1	O ar atmosférico.....	18
3.2	Principais poluentes atmosféricos.....	18
3.2.1	<i>Poluentes orgânicos.....</i>	19
3.2.2	<i>Poluentes inorgânicos.....</i>	20
3.2.2.1	<i>Monóxido de carbono(CO).....</i>	20
3.2.2.2	<i>Dióxido de carbono(CO₂).....</i>	20
3.2.2.3	<i>Dióxido de enxofre(SO₂).....</i>	21
3.2.2.4	<i>Óxidos de nitrogênio (NO_x).....</i>	21
3.2.2.5	<i>Amônia (NH₃).....</i>	22
3.2.2.6	<i>Ozônio (O₃).....</i>	22
3.2.3	<i>Outros poluentes de interesse.....</i>	23
3.2.4	<i>Material particulado (MP).....</i>	23
3.3	A poluição atmosférica em usinas siderúrgicas.....	24
3.4	Legislações da qualidade do ar.....	27
3.4.1	<i>Legislação brasileira.....</i>	27
3.4.2	<i>Legislação internacional.....</i>	30
4	METODOLOGIA.....	34
4.1	Área de estudo.....	34
4.2	Amostragem.....	34
4.3	Localização dos equipamentos e das fontes de emissões.....	36

4.4	Métodos analíticos.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1	Parâmetros meteorológicos.....	40
5.2	Monitoramento dos poluentes atmosféricos.....	47
6	CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

O aumento das atividades econômicas, sejam elas industriais, agrícolas ou de transportes tem contribuído para a poluição do ar. A Resolução CONAMA nº 491/2018 define poluente atmosférico como 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 (BRASIL, 2018).

Notadamente as alterações que ocorrem na atmosfera que causam impacto ambiental ou danos na saúde humana e aos materiais. As partículas sólidas, as partículas líquidas em suspensão, a contaminação por gases, por material biológico ou energia são todas formas características de poluição do ar. Existe uma relação direta entre poluição e morbidade, assim com a diminuição da qualidade do ar a saúde das pessoas é comprometida, ocorrendo o risco de acidente vascular cerebral, doenças cardíacas, câncer de pulmão e doenças respiratórias crônicas e agudas (OPAS; 2021)

As fontes de poluição do ar podem ser fixas, quando suas emissões proveem de equipamentos sem mobilidade como industriais, usinas etc.; e são moveis quando suas emissões proveem de equipamentos com mobilidade como carros, trens, aviões, etc. (DERISIO, 2012). A poluição do ar através de ações antropogênica compromete o equilíbrio dos gases na atmosfera, ocasionando a intensificação do efeito estufa, o desequilíbrio da capacidade da Terra de irradiar energia (radiação infravermelha) para fora do planeta, sendo um dos responsáveis pelo aquecimento global (SANTOS, 2011).

Sobre a temática das mudanças climáticas no planeta, em novembro de 2022 foi realizada no Egito a 27ª Conferência das Partes (COP-27). Nesta COP foram discutidas as formas de mitigação das emissões de gases do efeito estufa por representantes oficiais de governos e da sociedade civil com base no Protocolo de Kyoto de 1997 e o Acordo de Paris adotado em 2015 (UN, 2022).

A quantificação dos poluentes do ar se dar com a utilização de instrumentos específicos para cada substância presente na região estudada. Uma forma de prevenção, controle e monitoramento de poluentes atmosféricos é a utilização de estações de monitoramento da qualidade do ar. Neste âmbito a investigação da poluição atmosférica e o monitoramento da qualidade do ar em áreas urbanas e industriais é sempre um assunto de muito interesse científico e social.

No estado do Ceará, em particular, nas áreas densamente industrializadas os estudos de qualidade do ar ainda são escassos, principalmente quando se consideram os distritos industriais mais importantes nas cidades de Maracanaú e São Gonçalo do Amarante, os quais iniciaram suas atividades produtivas em 1963 e 2002, respectivamente.

Assim, nesta pesquisa são propostos estudos de avaliação da qualidade do ar em áreas impactadas pelas emissões do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). O CIPP está situado nos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e é parte integrante do Plano de Desenvolvimento Sustentável do Ceará sendo concebido para desenvolver o parque industrial do Ceará e de sua área de influência regional a partir da implantação de projetos-âncora, que incluem: uma usina siderúrgica, uma refinaria de petróleo, usinas termelétricas, uma unidade de regaseificação de gás natural liquefeito (GNL) e um centro de tancagem de combustível. A área do CIPP compreende zonas de proteção ambiental, zonas de expansão urbana, instalações portuárias e áreas para ocupação industrial e de serviços (INESP, 2013).

Atualmente, várias empresas e equipamentos já se encontram em funcionamento no CIPP contribuindo para emissão de diversas substâncias na atmosfera, destacando-se neste contexto as correias transportadoras de minério de ferro e carvão mineral e a usina siderúrgica integrada. Na área do CIPP o controle das emissões poluentes é realizado por estações de monitoramento da qualidade do ar dispostas na circunvizinhança das correias transportadoras e da usina siderúrgica, mantidas e operadas pelas empresas licenciadas, as quais tem suas operações sob fiscalização direta da Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE).

Em termos, o transporte de matérias-primas e a operação de uma indústria siderúrgica gera significativas quantidades de resíduos perigosos e emite grandes quantidades de poluentes para a atmosfera, o que pode comprometer a saúde e o bem-estar de funcionários e das pessoas que habitam as diversas comunidades no seu entorno. Materiais particulados, óxidos de carbono, de nitrogênio e de enxofre, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), compostos orgânicos voláteis (COV) como benzeno, etilbenzeno, dioxinas e furanos são alguns poluentes gerados durante o funcionamento de uma siderúrgica (FERREIRA LEMOS *et al.*, 2023).

Com bases nestes contextos, este trabalho visa monitorar as emissões atmosféricas e a qualidade do ar em áreas sob influência de uma usina siderúrgica integrada de um Complexo Industrial e Portuário de grande porte. Os possíveis impactos ambientais decorrentes serão avaliados a partir de parâmetros (padrões) estabelecidos nas legislações brasileira e internacionais vigentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Monitorar poluentes atmosféricos e avaliar a qualidade do ar na área do Complexo Industrial e Portuário do Pecém no município de São Gonçalo do Amarante, Ceará, Brasil.

2.2 Objetivos específicos

- Monitorar os particulados atmosféricos (PTS, PM₁₀ e PM_{2.5}) na área do complexo industrial e portuário do Pecém.
- Monitorar os gases inorgânicos poluentes (NO₂ e SO₂) na área do complexo industrial e portuário do Pecém.
- Avaliar a influência das variáveis meteorológicas (precipitação pluviométrica, umidade relativa, temperatura, velocidade do vento) sobre as concentrações dos poluentes atmosféricos monitorados.
- Avaliar a qualidade do ar na área em estudo a partir dos poluentes monitorados, considerando as legislações vigentes no Brasil e no mundo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O ar atmosférico

A atmosfera é uma camada fina de gases orgânicos e inorgânicos que recobre a terra, possuindo uma espessura aproximada de 1% do raio do planeta. Os constituintes da atmosfera variam ligeiramente dependendo das condições de cada local. A atmosfera possui uma composição bem simples formada por 78,08% de nitrogênio; 20,95% de oxigênio; 0,93% de argônio e 0,035% de dióxido de carbono. Além destes, a atmosfera contém quantidades variáveis de vapor de água, gases nobres, metano, dióxido de enxofre, ozônio, óxidos de nitrogênio e muitos tipos diferentes de aerossóis (HOEFS; HARMON, 2022). A atmosfera pode ser dividida em cinco camadas principais a partir da superfície terrestre: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e ionosfera (BLAY *et al.*, 2019).

Os principais fenômenos climáticos ocorrem na troposfera e na estratosfera. A troposfera é a camada que inicia a partir do nível do mar com uma espessura média de cerca de 12 km. A troposfera contém cerca de 75% da massa de ar total e quase todo o vapor de água. Nesta camada a temperatura diminui com a altitude e acontecem vários fenômenos atmosféricos e os problemas de poluição ligados a intervenção antropogênica. A estratosfera inicia após a troposfera até cerca de 50 km de altitude, ocorrendo aumento da temperatura com a altitude. A camada de ozônio presente na estratosfera absorve a radiação ultravioleta do sol com comprimentos de onda de 200-300 nm (BLAY *et al.*, 2019).

As emissões naturais, erupções vulcânicas e da biosfera, e a poluição antropogênica, causam impactos na composição atmosférica. A concentração de determinado poluente no ar atmosférico é variável em função das reações que ocorrem, da topografia da região e de fatores meteorológicos. As principais variáveis meteorológicas que afetam as concentrações dos poluentes na atmosfera são: pressão atmosférica, precipitação e evaporação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, insolação e nebulosidade, vento e estabilidade atmosférica (HOEFS; HARMON, 2022).

3.2 Principais poluentes atmosféricos

Os poluentes podem ser classificados como primários ou secundários. Os primários são emitidos diretamente das fontes móveis ou fixas para a atmosfera. Os secundários são os

poluentes resultantes de reações químicas entre poluentes primários ou com outros componentes presentes naturalmente na atmosfera (CETESB, 2022).

De acordo com sua origem os poluentes podem ser de origem natural, sem interferência da atividade humana, como as erupções vulcânicas, pulverização marinha, as emissões da biosfera e ressuspensão do solo, e de origem antropogênica, quando decorrem de alguma atividade humana, como processos industriais, queima de combustíveis fósseis, extração mineral (BLAY *et al.*, 2019). Segundo a sua composição os poluentes atmosféricos podem ser classificados em orgânicos e inorgânicos, como descrito a seguir.

3.2.1 Poluentes orgânicos

Um composto orgânico é qualquer um de uma grande classe de compostos químicos cujas moléculas contêm carbono. Por razões históricas, alguns tipos de compostos como carbonatos, óxidos simples de carbono e cianetos, bem como os alótropos de carbono, são considerados inorgânicos. A divisão entre compostos de carbono "orgânicos" e "inorgânicos" é útil, mas pode ser considerada um tanto arbitrária (USEPA, 2023).

Os principais poluentes orgânicos encontrados na atmosfera são representados pelos Compostos orgânicos voláteis (COV), Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) e pelas Bifenilas policloradas (PCB) (USEPA, 2023). Os compostos orgânicos voláteis possuem uma alta pressão de vapor, vaporizando mais facilmente a uma dada temperatura (ponto de ebulição abaixo de 260°C). A classe dos COV compreendem os hidrocarbonetos alifáticos (alcanos, alcenos), os hidrocarbonetos aromáticos (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno – BTEX), os halogenados (metilclorofórmio, etilcloroetileno), os oxigenados (álcoois, ésteres, aldeídos e cetonas) (CETESB, 2021).

Os COVs contribuem para a formação de ozônio troposférico, reagindo com óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO) na presença da luz solar, concorrendo para a formação do smog fotoquímico (USEPA, 2023).

As emissões de compostos orgânicos voláteis (COV) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), em geral, são associadas a queima de combustíveis fósseis, processos industriais, como produção de aço, estocagem e distribuição de combustíveis (CETESB, 2021). Na combustão incompleta de materiais orgânicos ocorre a produção de dioxinas e furanos (PCDD/F) e assim como as bifenilas policloradas (PCB) são altamente tóxicas e persistentes no ambiente, estando presentes em siderúrgicas, aterros sanitários e incineradores (SANTA-MARINA *et al.*, 2023; ZHOU *et al.*, 2023).

3.2.2 Poluentes inorgânicos

3.2.2.1 Monóxido de carbono (CO)

O monóxido de carbono (CO) é formado pela combustão incompleta de compostos que possuem carbono. O CO é um poluente atmosférico que se combina rapidamente com a hemoglobina do sangue causando a diminuição do transporte de oxigênio no sangue arterial e a hipóxia nos tecidos humanos. Em intoxicações leves (concentrações superiores a 50 ppm na atmosfera) causa tontura, dor de cabeça, fadiga, náuseas, vômitos e fraquezas dos membros. Quando o poluente atinge na atmosfera concentrações superiores a 800 ppm, pode ocorrer a anoxia grave, coma e morte do indivíduo (FAN *et al.*, 2023).

As fontes de CO incluem a queima de combustíveis fósseis e de biomassa, nos gases de combustão dos processos siderúrgicos, nos processos industriais, refino de petróleo, gases de escape de veículos, oxidação de hidrocarbonetos (HOEFS; HARMON, 2022).

3.2.2.2 Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono (CO₂) é resultante da oxidação de combustíveis ricos em carbono e produtos químicos, sendo um dos principais contribuintes para o aquecimento global e as mudanças climáticas (GÜR, 2022). O Potencial de Aquecimento Global (GWP) é usado como medida para expressar a contribuição individual dos gases do efeito estufa sobre o clima, representando a quantidade de energia absorvida por 1 tonelada de CO₂ durante um período 100 anos ou 20 anos, a depender dos bancos de dados utilizados. O CO₂ apresenta GWP = 1 (GÜR, 2022). O CO₂ presente na atmosfera funciona como um escudo térmico ao redor da Terra, absorvendo a radiação infravermelha emitida da superfície terrestre e reemitindo parte dela de volta ao planeta. O volume de CO₂ lançado na atmosfera representa o maior volume dentre os gases do efeito estufa.

As emissões de CO₂ ocorrem de fontes naturais, como erupções vulcânicas e incêndios florestais, e de atividades antropogênicas. O uso de combustíveis fósseis para geração de energia, transporte, processos industriais, como produção de cimento e aço, representa em torno de 70% das emissões globais de CO₂ (GÜR, 2022).

3.2.2.3 Dióxido de enxofre (SO_2)

Na atmosfera o enxofre se encontra no estado gasoso e após reações na forma de aerossóis de sulfato. O dióxido de enxofre (SO_2) é um gás não inflamável, incolor, altamente tóxico e irritante ao trato respiratório (HOEFS; HARMON, 2022). O SO_2 contribui para a formação das chuvas ácidas e *smogs* fotoquímico e ácido. A chuva ácida traz prejuízo aos ecossistemas aquáticos e terrestres e o aumento dos níveis de emissão de SO_2 favorece os riscos de problemas respiratórios graves aos indivíduos (YU *et al.*, 2023). As emissões naturais de SO_2 são emissões vulcânicas, de pulverização marítima, incêndios florestais, bactérias redutoras de enxofre. As emissões de atividades antropogênicas são provenientes da queima de combustíveis fósseis, escape de veículos, processos industriais, processos de produção de ferro e aço (HOEFS; HARMON, 2022; YU *et al.*, 2023).

3.2.2.4 Óxidos de nitrogênio (NO_x)

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) refere-se as substâncias: N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 e N_2O_5 , sendo as espécies: N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 e N_2O_5 mais instáveis e convertidas em NO e NO_2 (LI *et al.*, 2022). Os NO_x participam em reações fotoquímicas na atmosfera com COVs, CO e SO_2 contribuindo para a formação de ozônio troposférico. Os NO_x São responsáveis pela formação de chuvas ácidas de ácido nítrico e concorrem para a formação do smog fotoquímico. Na estratosfera atuam para a destruição catalítica da camada de ozônio (YU *et al.*, 2023).

Os NO_x colaboram para o agravamento do aquecimento global, de tal forma que a força radiativa infravermelha do N_2O (óxido nitroso) é cerca de 200 vezes maior que a do CO_2 por molécula. A contribuição do N_2O para o efeito estufa por molécula é maior que do CO_2 e do CH_4 (HOEFS; HARMON, 2022; YU *et al.*, 2023).

Nas atividades antropogênicas, as emissões de NO_x NO e NO_2 se sobressaem. As emissões de NO e NO_2 causam problemas respiratórios nos indivíduos a partir do comprometimento de bronquíolos e alvéolos pulmonares (LI *et al.*, 2022; YU *et al.*, 2023).

As emissões de NO_x para a atmosfera ocorrem de forma natural a partir dos processos de nitrificação e desnitrificação microbiana no solo e descargas elétricas na atmosfera. As emissões antropogênicas são também provenientes da queima de combustíveis fósseis e biomassa, de solos agrícolas, bovinos confinados, escape de veículos, processos industriais e processos de produção de ferro e aço (HOEFS; HARMON, 2022; YU *et al.*, 2023).

3.2.2.5 Amônia (NH_3)

A amônia (NH_3) é um gás incolor tóxico de ação corrosiva e caráter básico. Na atmosfera o NH_3 é o principal gás alcalino reagindo com ácidos inorgânicos, como SO_2 e NO_x formando os aerossóis de sulfato e nitrato de amônia (DONG *et al.*, 2023; JIANG *et al.*, 2023). Os sais particulados de amônio (NH_4^+) tem forte contribuição para formação de partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$). Devido o NH_4^+ ter uma vida útil mais longa que NH_3 (cerca de 1 dia para NH_3 e vários dias para NH_4^+) os sais formados podem ser transportados por distâncias mais longas (HSU *et al.*, 2023; SUN *et al.*, 2023).

A presença dos aerossóis e partículas finas formadas na atmosfera pelo NH_3 tem implicações na saúde humana, principalmente nas vias respiratórias, ocasionando também efeitos negativos nas mudanças climáticas (JIANG *et al.*, 2023; SUN *et al.*, 2023). As emissões antropogênicas de NH_3 incluem as fontes agrícolas e não agrícolas. Para fontes agrícolas são atribuídas a volatilização de fertilizantes sintéticos, produção agropecuária etc. Para fontes não agrícolas temos a contribuição dos gases dos escapamento de veículos leves e pesados, a queima de combustíveis fósseis, processos industriais e a produção de ferro e aço (DONG *et al.*, 2023; HSU *et al.*, 2023; JIANG *et al.*, 2023).

3.2.2.6 Ozônio (O_3)

O ozônio (O_3) presente na estratosfera tem função de proteção, absorvendo parte da radiação ultravioleta que chega ao planeta. Na camada inferior, próximo ao solo, o O_3 troposférico age como um poluente atmosférico (HOEFS; HARMON, 2022). O O_3 não é emitido por fontes antropogênicas sendo um poluente secundário formado por reações fotoquímicas de poluentes primário, principalmente COV e NO_x . O ozônio concorre para a formação do smog fotoquímico e alterações climáticas (YAO *et al.*, 2023). O O_3 próximo ao solo compromete a agricultura e processos fisiológicos dos vegetais. Nos seres humanos causa irritação dos olhos, inflamação das vias aéreas superiores e inferiores, asma, rinite alérgica, problemas cardiovasculares e mortalidade infantil (YAO *et al.*, 2023).

A produção de O_3 troposférico tem relação profunda com as atividades antropogênicas. A queima de combustíveis fósseis, o refino e transporte de petróleo, escape de veículos, processos industriais, processos de produção de ferro e aço, processos de produção de cimento contribuem para as emissões precursoras de formação do ozônio (WANG *et al.*, 2022a).

3.2.3 Outros poluentes de interesse

Existem alguns elementos químicos necessários para animais e vegetais em concentrações muito baixas, miligramas por quilograma (mg/kg) ou partes por milhão (ppm), os oligoelementos. Concentrações acima de um certo limiar são consideradas tóxicas para os seres humanos e os ecossistemas (LAU *et al.*, 2021). Os oligoelementos se comportam de maneiras diferentes quando submetidos a altas temperaturas. O V, Cr, Mn, Co e Ni permanecem no estado sólido. O Zn, Pb, Cd e o As se volatizam parcialmente e Hg, F, Cl e Br se volatilizam. As emissões ocorrem na forma de gás ou partículas finas (PM₁₀, PM_{2.5}) e os elementos não voláteis se mantêm no resíduo de combustão (HAN *et al.*, 2021; LAU *et al.*, 2021).

Os oligoelementos se deslocam por grandes distâncias, depositam-se sobre o solo agrícola e a água contaminando-os, e entram na cadeia alimentar ameaçando a saúde humana. As principais fontes de atividades antropogênicas são emissões oriundas dos processos de produção de ferro e aço, processos de produção de cimento e usinas de energia a carvão (HAN *et al.*, 2021; LAU *et al.*, 2021).

3.2.4 Material particulado (MP)

Segundo a OMS material particulado (MP) em ambientes urbanos e não urbanos é uma mistura complexa com componentes com diversas características químicas e físicas. Essa complexidade é devido sua natureza dinâmica de ser transportado pelo ar, ser formado por via primária ou secundária e sofrer transformações química e física na atmosfera (WHO, 2021).

As partículas são classificadas pelo seu diâmetro aerodinâmico, cujas propriedades determinam seus processos de transporte e remoção no ar, locais de deposição e vias de depuração dentro do trato respiratório (WHO, 2021). As medições são realizadas, em geral, para os seguintes parâmetros: PTS, PM₁₀ e PM_{2.5}. As PTS, partículas totais em suspensão, são as partículas com diâmetro aerodinâmico menores que 50 µm, apesar de conter partículas inaláveis, serve de índice de avaliação do grau de sujeidade de uma região. Os PM₁₀ são partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm que penetram no trato respiratório, sendo uma parcela delas retida nas vias aéreas superiores. Os PM_{2.5} são partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm que penetram profundamente no aparelho respiratório atingindo os alvéolos (CETESB, 2022).

As fontes naturais de aerossóis e partículas são provenientes da pulverização marinha, poeira mineral soprada pelo vento, emissões vulcânicas, partículas biogênicas emitidas pelas plantas, produtos de conversão de gás natural em partículas (HOEFS; HARMON, 2022). As fontes de atividades antropogênicas são oriundas de queima de combustíveis fósseis, processos de produção de ferro e aço, processos de produção de cimento, usinas de energia a carvão, produção agropecuária, processos industriais, desgastes de freios e pneus veiculares etc. (HSU *et al.*, 2023; YANG *et al.*, 2018; YU *et al.*, 2023).

Os MP compromete a visibilidade, causa alterações climáticas e colaboram para o agravamento do aquecimento global modificando a força radiativa infravermelha (HSU *et al.*, 2023). O MP é capaz de penetrar profundamente no pulmão e entrar na corrente sanguínea causando impactos cardiovasculares, cerebrovasculares e respiratórios sendo também o indicador mais utilizado para avaliar os efeitos da exposição à poluição atmosférica sobre a saúde (WHO, 2021).

3.3 A poluição atmosférica em usinas siderúrgicas

A indústria siderúrgica é uma atividade econômica que utiliza recursos naturais e de energia de forma intensiva e no seu processo produtivo é gerada uma grande quantidade de resíduos, efluentes e emissões atmosféricas (HASANBEIGI; ARENS; PRICE, 2014; RIZZO, 2005, 2015).

Na transformação de minério de ferro em aço que ocorre na indústria siderúrgica as fases de processamento envolvem: a redução do minério, o refino e a laminação do aço. As rotas tecnológicas ocorrem em usinas integradas, usinas semi-integradas e usinas não-integradas. Os processos se desenvolvem via uma rota primária, onde minério de ferro é usado como matéria-prima (podendo usar um percentual de sucata), ou via uma rota secundária onde sucata é usada como matéria-prima (podendo usar também o ferro gusa) (RIZZO, 2005, 2015; SUN *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020).

Nas usinas tipo integradas ocorre as três etapas do processo produtivo: redução, refino e laminação. Nas usinas semi-integradas ocorrem apenas as etapas de refino e laminação. Nas usinas não-integradas ocorre o processo de redução ou laminação. Na rota primária temos o processo alto forno/forno básico com oxigênio (BF-BOF) e a redução direta (DRI). Nesta rota o minério de ferro será beneficiado em etapas de pelletização e sinterização para posterior uso no alto forno ou no forno de redução direta. Na rota secundária temos utilização de forno de arco elétrico (EAF).

Cerca de 75% e 25% de aço produzido no mundo provém da rota primária e da rota secundária respectivamente (HASANBEIGI; ARENS; PRICE, 2014; RIZZO, 2005, 2015; SUN *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020).

Operacionalmente, no pátio de matérias-primas ocorre o recebimento, classificação, armazenamento e preparação das matérias-primas a serem empregadas no processo produtivo. O material recebido é o minério de ferro (sinter feed, pelota), carvão (coqueificável, antracito) e fundentes (calcário, dolomita, quartzito). O fluxo de materiais sólidos no pátio provoca a emissão de particulados de minério de ferro, carvão, coque, fundentes e de outros resíduos armazenados. Para evitar o escape de particulado para fora da área do pátio são utilizados nas pilhas e nas vias principais de acesso um sistema de aspersão de água; enquanto nas calhas de transferência e nas correias transportadoras estão instaladas coifas e tubulações que direcionam o MP para os filtros de mangas (RIZZO, 2005, 2015).

O carvão precisa ser beneficiado para uso nos processos e operações da siderurgia. Na coqueria o carvão é colocado em um conjunto de fornos fechados de pequena largura em relação ao comprimento e a altura. Na preparação do carvão para ser usado nos fornos de coque, correias transportadoras deslocam carvão do pátio para silos de estocagem e posteriormente para os silos de dosagens, sendo posteriormente descarregado sobre uma outra correia transportadora ocorrendo a mistura dos vários tipos de carvão. A correia transporta a mistura para a torre de carvão na coqueria que alimenta o carro de carregamento de carvão nas baterias de fornos. Esta movimentação do carvão nos transportes, no britador, nos silos e na torre provoca a emissão fugitiva de particulados. Estes particulados são coletados através de coifas instaladas e tubulações direcionando o material particulado para um sistema de despoeiramento tipo filtros de mangas (DE OLIVEIRA CARNEIRO *et al.*, 2021; FARIAS NETO *et al.*, 2021; RIZZO, 2005, 2015).

Na operação das baterias de fornos que transformam carvão em coque e na planta de tratamento do gás de coqueria ocorrem emissões pontuais e fugitivas de particulados e gases diversos, como: COVs, HPAs, dioxinas e furanos, NH₃, H₂S, HCN, vapor d'água, SO_x, NO_x, CO, CO₂, BTX, enxofre etc. (CHENG *et al.*, 2010; DE OLIVEIRA CARNEIRO *et al.*, 2021; DUFFY; MAHONEY; STEEL, 2010; MU *et al.*, 2013; RIZZO, 2005, 2015).

A sinterização é uma etapa importante do processo siderúrgico e nela se prepara o minério de ferro para o processamento no alto forno. Na máquina de sinter as diferenças de temperatura na direção axial do leito da camada sobre a esteira metálica resultam em várias reações físicas e químicas com transferência de calor e massa e perda de peso da mistura. Esta perda de peso tem como resultado a emissão de particulados e gases. Os particulados são

representados principalmente pelo PM_{10} e $PM_{2.5}$ e os gasosos pelo SO_2 , NO_x , CO_x , dioxinas e furanos, PCB, Hg, HCl, HPA, COV etc. (JI *et al.*, 2017, 2020; LI *et al.*, 2019; QIAN *et al.*, 2018; SHEN *et al.*, 2021a; XU *et al.*, 2017; ZHAN *et al.*, 2019).

O Alto-forno opera como um reator destinado a produzir ferro-gusa. O carregamento das matérias-primas é pelo topo em camadas alternadas de minério granulado, sinter, pelotas e fundentes com coque formando a carga. O peneiramento, o transporte para os silos de estocagem, a pesagem e transferência para correia transportadora e o enchimento do Alto-forno provocam emissões fugitivas de particulados, principalmente PM_{10} e $PM_{2.5}$. Nos regeneradores ocorrem as trocas de calor que aquecem o ar atmosférico e gases usados no Alto-forno (ERTEM; GÜRGEN, 2006; PUGH *et al.*, 2013; RIZZO, 2005, 2015).

No interior do Alto forno com a continuidade da ascensão gasosa, o aquecimento da carga e as reações químicas se processando, emissões de particulados, principalmente de PM_{10} e $PM_{2.5}$, e gases (CO , CO_2 , SO_2 , H_2S , NO_x , N_2) são recolhidas no topo do equipamento e ferro-gusa e escória na base. O ferro-gusa obtido na redução no Alto-forno segue para refino na Aciaria onde um conjunto de processos transforma o ferro gusa líquido em aço bruto. A dessulfuração do ferro-gusa nos reatores provoca emissões fugitivas de particulados, principalmente PM_{10} e $PM_{2.5}$ e gases (CO , CO_2 , O_2 , H_2 , SO_2 , NO_x , N_2), o que ocorre também no refino primário. A operação do refino secundário, por sua vez, também provoca emissões fugitivas de particulados e gases.

Por fim no lingotamento contínuo o aço líquido do refino secundário da aciaria sofre um resfriamento controlado vazado em molde para solidificação em placas de dimensões previamente definidas. A transferência do aço líquido da panela para o distribuidor provoca emissões fugitivas de particulados, principalmente PM_{10} e $PM_{2.5}$. (CRAIG; CAMISANI-CALZOLARI; PISTORIUS, 2001; KLIMEŠ *et al.*, 2020; RIZZO, 2005, 2015).

Uma siderúrgica de grande porte tipo usina integrada possui uma termelétrica interna para produção e consumo de energia elétrica, a qual junto à Turbina de Recuperação de pressão de Topo (TRT) do Alto-forno tornam a usina autossuficiente em energia elétrica. A termelétrica possui uma caldeira para geração de vapor e uma turbina para geração de energia elétrica. A caldeira utiliza como combustível a queima de gases siderúrgicos (mistura de gás de coqueria – COG, gás de Alto-forno – BFG e gás de aciaria – LDG). O gás liquefeito de petróleo (GLP) é usado como combustível reserva e de ignição. A queima dos gases usados na operação da caldeira provoca emissões pontuais de particulados, principalmente PM_{10} e $PM_{2.5}$ e gases como: CO , CO_2 , SO_2 , NO_x etc. (HOU *et al.*, 2011; RIZZO, 2015; ZHAO *et al.*, 2017).

3.4 Legislações da qualidade do ar

3.4.1 Legislação brasileira

Na América Latina, o Brasil foi o primeiro país a legislar sobre o controle da poluição atmosférica) através do Decreto-Lei nº 1.413/1975 que dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais e complementado pela Lei nº 6.803/1980 que dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial nas áreas críticas de poluição. As duas normas não definiam poluição e não apresentavam parâmetros de controle. Com a Lei nº 6.938/1981 foi instituída a Política Nacional do Meio Ambiente, na qual são apresentados os órgãos e entidades que constituirão o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), cabendo ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo, a atribuição de estabelecer normas, critérios e padrões (BRASIL, 1975, 1980, 1981).

A Resolução CONAMA nº 18/1986 dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores (PROCONVE) e estabelece os limites máximos de emissão de gases de escapamento para o ar atmosférico (BRASIL, 1986).

A Resolução CONAMA nº 5/1989 dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR). Tendo como estratégia básica limitar, a nível nacional, as emissões por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos padrões de qualidade do ar como ação complementar de controle. Os instrumentos do PRONAR envolvem: os limites máximos de emissão; os padrões de qualidade do ar do PROCONVE, o PRONACOP (Programa Nacional de Controle da Poluição Industrial); o Programa Nacional de Avaliação da Qualidade do Ar; o Programa Nacional de Inventário de Fontes Poluidoras do Ar e os Programas Estaduais de Controle da Poluição do Ar (BRASIL, 1989). A Resolução CONAMA nº 5/1989 foi complementada pelas Resoluções nº 03, de 1990, nº 08, de 1990 e nº 436, de 2011.

A Resolução CONAMA nº 3/1990 dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR, cujas substâncias usadas no controle da poluição atmosférica são: partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis, fumaça preta, SO₂, CO, O₃ e NO₂ (BRASIL, 1990a).

Esta resolução estabeleceu dois padrões de qualidade do ar (BRASIL, 1990a):

- Padrões Primários de Qualidade do Ar – São as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população;

- Padrões Secundários de Qualidade do Ar – São as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

A Resolução CONAMA nº 8/1990 dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição. Esta resolução foi atualizada pela Resolução CONAMA nº 382/2006 que estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Nesta resolução os limites são fixados por poluente e por tipologia de fonte conforme estabelecido nos anexos da resolução (BRASIL, 1990b, 2006).

A Resolução CONAMA nº 436/2011 estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Esta resolução complementa as Resoluções nº 05/1989 e nº 382/2006, onde os limites são fixados por poluente e por tipologia de fonte conforme estabelecido nos anexos da resolução (BRASIL, 2011).

A Tabela 1 apresenta os limites de emissão para poluentes atmosféricos gerados nas indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas e usinas de pelotização de minério de ferro do anexo XIII das Resoluções 382/2006 e 436/2011.

Tabela 1 — Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos gerados em indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas

Unidade de Produção	Fontes de Emissão Pontual	MP⁽¹⁾	SO₂ ⁽¹⁾	NO_x⁽¹⁾ (como NO₂)	% O₂
Coqueria	Sistema de Despoeiramento do Desenformamento	40	NA	NA	NA
	Câmara de Combustão dos Fornos de Coque	50	800	700	7%
Sinterização	Sistema Primário de Despoeiramento	70	600	700	NA
	Sistema Secundário de Despoeiramento	70	NA	NA	
Alto forno a coque	Sistema de Despoeiramento da Casa de Estocagem	40	NA	NA	
	Sistema de Despoeiramento da Casa ou Ala de Corrida	40	NA	NA	
Alto forno a carvão vegetal	Sistema de Despoeiramento da Casa de Estocagem	50	NA	NA	
	Sistema de Despoeiramento da Casa ou Ala de Corrida	50	NA	NA	

Aciaria LD	Sistema Primário de Despoeiramento	80	NA	NA	8%
	Sistema Secundário de Despoeiramento	40	NA	NA	
	Sistema de Despoeiramento da Dessulfuração de Gusa	40	NA	NA	
	Sistema de Despoeiramento dos Fornos de Cal	100	NA	NA	
Aciaria elétrica	Sistema Primário de Despoeiramento ⁽²⁾	≤ 50 t/c: 50	NA	NA	NA
	Sistema Secundário de Despoeiramento ⁽²⁾	> 50 t/c: 40			
Laminação	Fornos de Reaquecimento de Placas com Queima de Gases Siderúrgicos	50 ^a	800 ^a	700	7%
		60 ^b	1000 ^b		
Pelotização	Sistema de Exaustão	70	700	700	NA
Central termelétrica	Caldeira com Queima de Gases Siderúrgicos	60	600	350	5%

(1) Os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e no teor de O₂ explicitado. (2) t/c = toneladas de aço/corrida. NA = Não Aplicável. ^a: Resolução CONAMA nº 382/2006. ^b: Resolução CONAMA nº 436/2011.

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA nº 382/2006 e nº 436/2011.

Em 2018, a Resolução CONAMA nº 3/1990 foi atualizada pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que além de considerar as definições e padrões do PRONAR revisou os padrões de qualidade do ar com base nos valores guia da Organização Mundial de Saúde (OMS) de 2005. Nestas atualizações os poluentes atmosféricos prioritários são representados pelo: PTS, material particulado PM₁₀, material particulado PM_{2,5}, fumaça preta, SO₂, CO, O₃, NO₂ e Pb. Os padrões de qualidade do ar intermediários (PI) são padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas visando alcançar o valor do padrão de qualidade do ar final (PF).

A Tabela 2 mostra os valores dos Padrões de Qualidade do Ar em vigor definidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).

Tabela 2 — Padrões de qualidade do ar vigentes no Brasil

Poluente atmosférico	Período de referência	PI-1 µg/m ³	PI-2 µg/m ³	PI-3 µg/m ³	PF µg/m ³	PF ppm
Material particulado (PM ₁₀)	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Material particulado (PM _{2,5})	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ¹	20	17	15	10	-

Dióxido de enxofre (SO ₂)	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	1 hora ²	260	240	220	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	-
Ozônio (O ₃)	8 horas ³	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Monóxido de carbono (CO)	8 horas ³	-	-	-	-	9
Partículas totais em suspensão (PTS)	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
Chumbo (Pb ⁵)	Anual ¹	-	-	-	0,5	-

1 - Média aritmética anual; 2 - média horária; 3 - máxima média móvel obtida no dia, 4 - média geométrica anual; e 5 - medido nas partículas totais em suspensão.

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA nº 491/2018.

3.4.2 Legislação internacional

Nos Estados Unidos da América (EUA) a Lei do Ar Limpo estabelece seis poluentes principais para fixar Normas Nacionais de Qualidade do Ar Ambiente (NAAQS) sendo definidas normas para proteção da saúde pública (padrões primários) e para proteção do bem-estar público (padrões secundários). O padrão primário visa a proteção de populações sensíveis asmáticos, crianças e idosos. O padrão secundário visa a proteção sobre danos a animais, plantações, solos, água e visibilidade. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA) é a responsável por estabelecer as normas em território americano (USEPA, 2023).

A Tabela 3 mostra os padrões de qualidade do ar para os EUA.

Tabela 3 — Padrões de qualidade do ar adotados pela USEPA

Poluente		Padrão	Tempo de amostragem	Concentração	Forma de atendimento
Monóxido de carbono (CO)		Primário	8 h	9 ppm	Não deve ser excedido mais de uma vez por ano
			1 h	35 ppm	
Chumbo (Pb)		Primário e secundário	Média móvel trimestral	0,15 µg/m³	Não deve ser excedido
Dióxido de nitrogênio (NO₂)		Primário	1 h	100 ppb (190 µg/m³)	Média de 3 anos do percentil 98 de cada ano calculada a partir das máximas diárias de 1 hora
		Primário e secundário	Média aritmética anual	53 ppb (99 µg/m³)	Média anual
Ozônio (O₃)		Primário e secundário	8 h	0,070 ppm (137 µg/m³)	Média de 3 anos, da quarta máxima de cada ano, calculada a partir das máximas diárias de oito horas
Partículas (PM)	PM _{2,5}	Primário	Média aritmética anual	12 µg/m³	média de 3 anos das médias anuais
		Secundário	Média aritmética anual	15 µg/m³	média de 3 anos das médias anuais
		Primário e secundário	24 h	35 µg/m³	Média de 3 anos do percentil 98 de cada ano, calculado a partir das médias diárias de 24 horas
	PM ₁₀	Primário e secundário	24 h	150 µg/m³	Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano, na média de 3 anos
Dióxido de enxofre (SO₂)		Primário	1 h	75 ppb (196 µg/m³)	Percentil 99 das concentrações máximas diárias de 1h, em média ao longo de 3 anos
		Secundário	3 h	0,5 ppm (1,308 µg/m³)	Não deve ser excedido mais de uma vez por ano

Fonte: Adaptado de NAAQS/USEPA (2022).

A União Europeia (UE), por sua vez, utiliza diretivas para normatizar a qualidade do ar ambiente. A Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu estabelece padrões de qualidade do ar para 12 poluentes atmosféricos. Os padrões são definidos como valor-limite e valor-alvo, os quais visam a proteção da saúde humana e do ambiente. Para um padrão de valor-limite é exigido o atendimento a partir da data em que ele entra em vigor. Um padrão de valor-alvo é uma meta a ser alcançada e para ser atingido deve descrever as ações a serem tomadas. A Agência Europeia do Ambiente (EEA) gerencia o cumprimento dos padrões (EEA, 2022).

A Tabela 4 mostra os padrões de qualidade do ar da UE.

Tabela 4 — Valores de referência de qualidade do ar adotados pela União Européia

Poluente	Concentração	Tempo de amostragem	Valor-limite	Valor-alvo	Ultrapassagens permitidas/Ano
Partículas finas (PM _{2.5})	25 µg/m ³	1 ano	x	-	-
Partículas (PM ₁₀)	50 µg/m ³	24 h	x	-	35
	40 µg/m ³	1 ano	x	-	-
Dióxido de enxofre (SO ₂)	350 µg/m ³	1 h	x	-	24
	125 µg/m ³	24 h	x	-	3
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	200 µg/m ³	1 h	x	-	18
	40 µg/m ³	1 ano	x	-	-
Chumbo (Pb)	0,5 µg/m ³	1 ano	x	-	-
Monóxido de carbono (CO)	10 mg/m ³	Média máxima diária de 8 h	x	-	-
Benzeno	5 µg/m ³	1 ano	x	-	-
Ozônio (O ₃)	120 µg/m ³	Média máxima diária de 8 h	-	x	25 dias em média, por ano, ao longo de 3 anos
Arsênio (As)	6 ng/m ³	1 ano	-	x	-
Cádmio (Cd)	5 ng/m ³	1 ano	-	x	-
Níquel (Ni)	20 ng/m ³	1 ano	-	x	-
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP)	1 ng/m ³ (expressa em concentração de benzo(a)pireno)	1 ano	-	x	-

Fonte: Adaptado da Diretiva 2008/50/CE (2015).

Em 2006 a Organização Mundial de Saúde (OMS) lançou as diretrizes de qualidade do ar, as quais apresentavam valores-guia baseados na saúde para os principais poluentes atmosféricos prejudiciais à saúde, incluindo partículas inaláveis ou material particulado (MP), ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂) (OPAS; 2021).

Após 15 anos a OMS revisou suas recomendações e publicou no final de 2021 novos valores-guia para o gerenciamento da qualidade do ar, incluindo as partículas inaláveis (PM_{2.5} e PM₁₀), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono. O documento apresenta valores intermediários e um valor guia final dos poluentes a monitorar. As metas intermediárias são níveis de poluentes do ar que são mais elevados do que os valores-guia, mas que as autoridades em áreas altamente poluídas podem usar para formular políticas de redução da poluição que sejam atingíveis dentro de prazos realistas. As metas intermediárias devem ser consideradas como etapas em direção ao cumprimento final dos valores-guia no futuro, e não como metas finais (OPAS; 2021).

A Tabela 5 mostra os Valores-guia de qualidade do ar recomendados pela OMS.

Tabela 5 — Valores-guia de qualidade do ar da Organização Mundial de Saúde

Poluente	Período de referência	Meta intermediária				Valor-guia
		1	2	3	4	
MP _{2.5} (µg/m ³)	Anual	35	25	15	5	5
	24 h ^a	75	50	37,5	25	15
MP ₁₀ (µg/m ³)	Anual	70	50	30	20	15
	24 h ^a	150	100	75	50	45
O ₃ (µg/m ³)	Alta temporada ^b	100	70	—	—	60
	8 h ^a	160	120	—	—	100
NO ₂ (µg/m ³)	Anual	40	30	20	—	10
	24 h ^a	120	50	—	—	25
SO ₂ (µg/m ³)	24 h ^a	125	50	—	—	40
CO (mg/m ³)	24 h ^a	7	—	—	—	4

Fonte: Adaptado das diretrizes globais de qualidade do ar da OMS (WHO, 2021).

^a: percentil 99 (ou seja, 3-4 dias excedendo a meta por ano). ^b: Média aritmética da concentração média diária máxima de O₃ em 8 horas nos 6 meses consecutivos com a maior concentração média de O₃ (média móvel de 6 meses).

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

O complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) está localizado no distrito do Pecém entre os municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante, ocupando uma área de 18.593 ha, distante 60 km de Fortaleza, a capital do estado. O complexo industrial limita-se ao norte com a Estação Ecológica do Pecém, ao sul com a rodovia BR-222, a leste com a rodovia CE-421 e a oeste com a CE-156 (DA COSTA, COSTA, 2021). A usina siderúrgica em estudo compreende uma área de 571 ha, se localizando dentro da Zona de Processamento de Exportação (ZPE) do complexo industrial. Esta siderúrgica possui atualmente uma capacidade instalada de 3 milhões de toneladas de placas de aço/ano com produção iniciada em junho de 2016 (AECIPP, 2023).

A siderúrgica é uma usina tipo integrada tendo uma unidade de redução composta por recebimento de matéria-prima, pátio de estocagem de matéria-prima, calcinação, coqueria, sinterização, alto forno e uma unidade de refino composta por aciaria e lingotamento contínuo.

A usina recebe minério de ferro e o carvão em navios que aportam no porto do Pecém através de uma sistema de correias transportadoras do tipo tubular fechadas que realizam a transferência até o pátio, em um percurso de 10 km. O sistema é composto de uma correia para o minério de ferro e uma correia para o carvão. Os fundentes são descarregados no pátio por caminhões. A delimitação da área de estudo está centrada no entorno das correias e da própria siderúrgica.

4.2 Amostragem

As amostragens foram realizadas no período de janeiro de 2022 a junho de 2022 (estação chuvosa) e julho de 2022 a dezembro de 2022 (estação seca). As informações foram obtidas a partir de consulta autorizada e certificada dos seguintes documentos: 1 – Relatório Semestral de Monitoramento Ambiental: Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar da Fase Operação e 2 – Relatório Semestral de Monitoramento Ambiental: Programa de Monitoramento das Emissões Atmosféricas da Fase Operação. Os documentos foram apresentados pela usina siderúrgica a Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) e fazem parte de obrigações de automonitoramento junto ao órgão ambiental para funcionamento do empreendimento referente a sua licença de operação ambiental.

Os equipamentos utilizados nas amostragens são de responsabilidade da empresa siderúrgica e compõem uma estação de monitoramento que realiza as determinações de material particulados envolvendo: um amostrador de grandes volumes para PTS (AGV-PTS ou HI-Vol PTS); um amostrador de grandes volumes para PM_{10} (AGV- PM_{10} ou HI-Vol PM_{10}); 01 amostrador de grandes volumes para $PM_{2.5}$ (AGV- $PM_{2.5}$) ou HI-Vol $PM_{2.5}$). Para determinações de gases (SO_2 e NO_2) foi usado um amostrador de pequenos volumes para amostragem de gases (Trigas). Todos os equipamentos utilizados são fornecidos pela empresa Energética e passaram por calibrações periódicas durante o monitoramento.

A Figura 1 mostra os equipamentos usados na coleta dos poluentes atmosféricos.

Figura 1 — Equipamentos utilizados no monitoramento da qualidade do ar

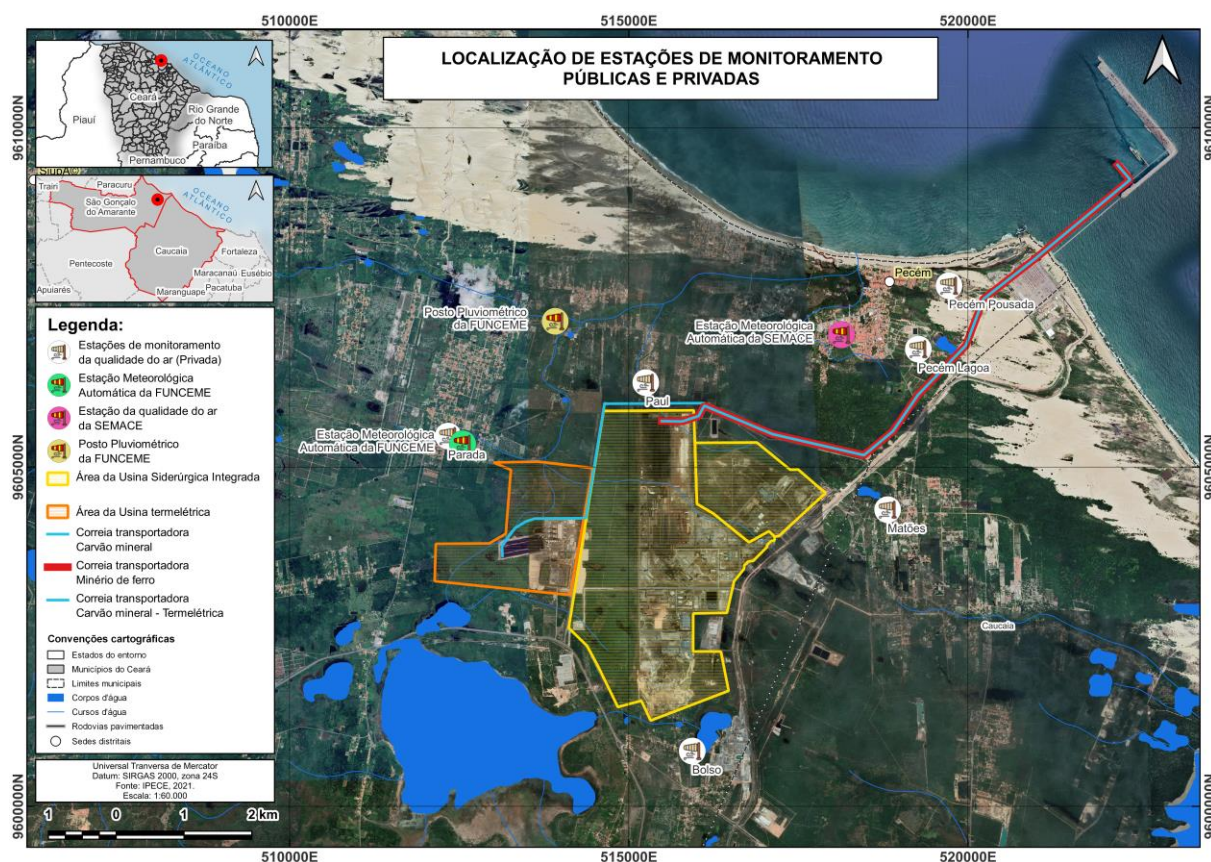


Fonte: Energética (2023).

4.3 Localização dos equipamentos e das fontes de emissões

Para o monitoramento da qualidade do ar na área da siderúrgica foram instaladas estações de monitoramento em seis comunidades no entorno do complexo industrial (Figura 2), a saber: Comunidade Bolso ($3^{\circ}36'41.41''\text{S}$; $38^{\circ}51'23.42''\text{O}$. Datum: SIRGAS 2000), Comunidade Matões ($3^{\circ}34'45.51''\text{S}$; $38^{\circ}49'50.08''\text{O}$. Datum: SIRGAS 2000), Comunidade Parada ($3^{\circ}34'10.20''\text{S}$; $38^{\circ}53'20.07''\text{O}$. Datum: SIRGAS 2000), Comunidade Paul ($3^{\circ}33'44.56''\text{S}$; $38^{\circ}51'45.65''\text{O}$. Datum: SIRGAS 2000), Comunidade Pecém Pousada ($3^{\circ}32'58.03''\text{S}$; $38^{\circ}49'20.76''\text{O}$. Datum: SIRGAS 2000), e Comunidade Pecém Lagoa ($3^{\circ}33'28.45''\text{S}$; $38^{\circ}49'35.44''\text{O}$. Datum: SIRGAS 2000). A localização das estações de monitoramento foi definida com base no estudo de dispersão atmosférica, parte integrante do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), na fase de implantação da usina siderúrgica.

Figura 2 — Localização das estações de monitoramento de poluentes na área do complexo industrial em estudo

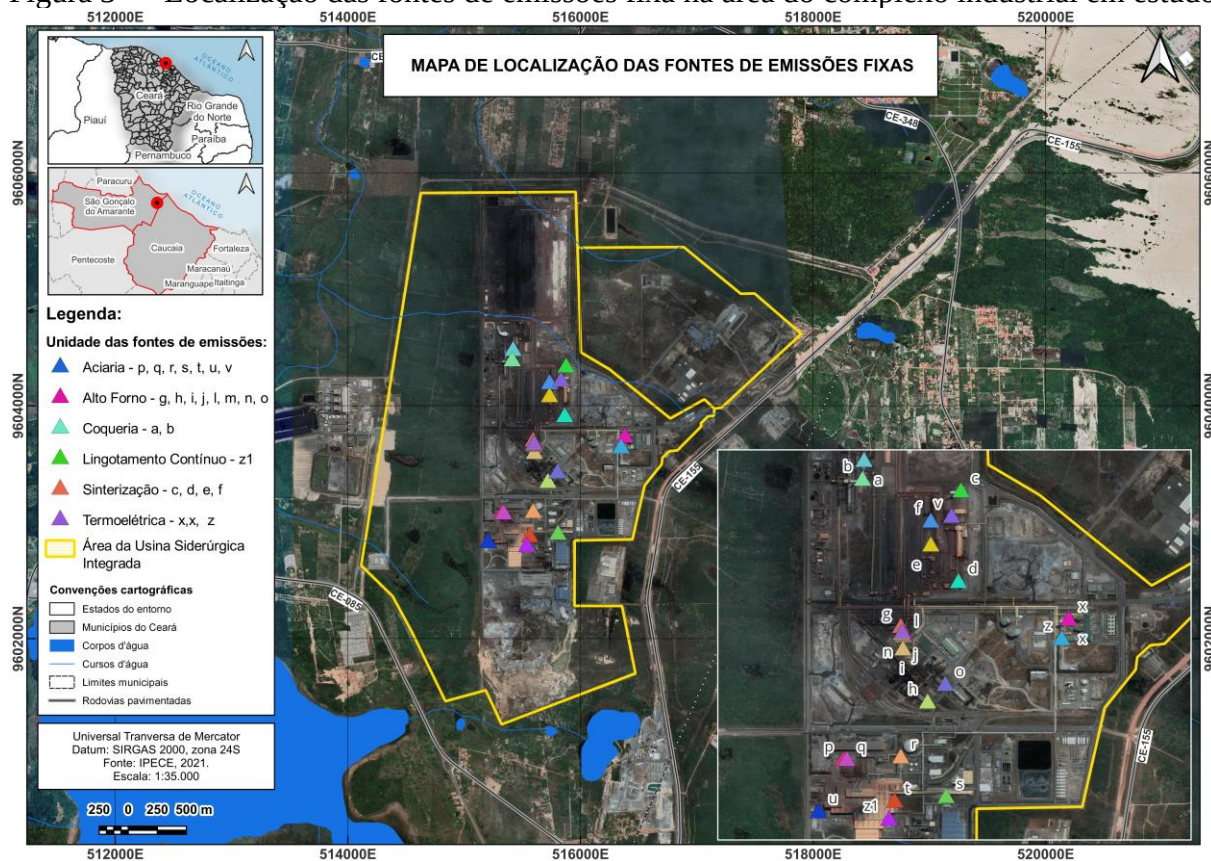


Fonte: Autor (2023).

Em termos de distâncias, a Estação Bolso dista 2650 m do alto forno da siderúrgica e 630 m da cerca de delimitação, a Estação Matões dista 3290 metros do alto forno e 940 m da cerca de delimitação, a Estação Parada dista 3868 m do alto forno, 2215 m da cerca de delimitação e 1695 m da termelétrica, a Estação Paul dista 2805 m do alto forno, 310 m da cerca de delimitação e 2420 m da Termelétrica, a Estação Pecém Pousada dista 5858 m do alto forno, 3595 m da cerca de delimitação e 548 m das correias transportadoras e pro fim a Estação Pecém Lagoa dista 4895 m do alto forno, 2656 m da cerca de delimitação e 482 m das correias transportadoras.

A Figura 3 mostra a localização das fontes/operações relacionadas às emissões fixas da siderúrgica.

Figura 3 — Localização das fontes de emissões fixa na área do complexo industrial em estudo



a-despoeiramento do desenformamento de coque; **b**-chaminé de combustão dos fornos de bateria de coque; **c**-precipitador primário; **d**-precipitador secundário; **e**-moagem de coque; **f**-silos de matérias primas; **g**-despoeiramento da casa de estocagem; **h**-despoeiramento da casa de corrida 1; **i**-regenerador; **j**-despoeiramento do PCI 1; **l**-despoeiramento do PCI 2; **m**-despoeiramento do PCI 3; **n**-despoeiramento do PCI 4; **o**-despoeiramento da casa de corrida 2; **p**-despoeiramento secundário (Convertedor) 1; **q**-despoeiramento secundário (Convertedor) 2; **r**-despoeiramento secundário (KR Bag Filter); **s**-despoeiramento secundário (Hopper Bag Filter); **t**-despoeiramento secundário (Área de Painéis Bag Filter); **u**-despoeiramento no refino do aço (RH's, LF's Bag Filter); **v**-chaminé do filtro de manga dos silos de abastecimento; **w**-caldeira 1; **x**-caldeira 2; **z**-caldeira auxiliar e **z1**-despoeiramento na área de lingotamento.

Fonte: Autor (2023).

4.4 Métodos analíticos

As amostragens de PTS, PM₁₀ e PM_{2,5} seguem como referência a programação anual de amostragem estabelecida pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), órgão ambiental do Rio de Janeiro, devido ausência de um cronograma estadual no Ceará, sendo adotada uma frequência de seis em seis dias. Particularmente, nos meses de agosto a dezembro, período de intensificação dos ventos na região, a amostragem foi realizada de três em três dias. O período de amostragem adotado foi de 24 horas.

Na determinação das partículas totais em suspensão (PTS) no amostrador de grande volume (AGV - PTS) o ar é succionado para o interior de um abrigo a uma vazão na faixa de 1,13 a 1,70 m³/min e passa através de um filtro de 8''x10'' modelo E55 de fibra de vidro que retém as partículas em suspensão com diâmetro menores que 100 µm. Um medidor de vazão registra a quantidade de ar que passa pelo filtro. A determinação da concentração das partículas é feita de forma gravimétrica relacionando a massa retida no filtro e o volume de ar succionado e a concentração final é expressa em µg/m³.

Na determinação das partículas inaláveis (PM₁₀) no amostrador de grande volume (AGV – PM₁₀) o ar é succionado para o interior de um abrigo a uma vazão de 1,13 m³/min passando através de um filtro de 8''x10'' E55 de fibra de vidro que retém as partículas em suspensão. A geometria da entrada da cabeça do amostrador favorece a coleta de apenas partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 µm. Um medidor de vazão registra a quantidade de ar que passa pelo filtro. A concentração (µg/m³) das partículas é feita de forma gravimétrica relacionando a massa retida no filtro e o volume de ar succionado. O controle de vazão e a estimativa da concentração de poluentes foi feita conforme relatado para a determinação de PTS.

Por fim, para a determinação das partículas inaláveis (PM_{2,5}) no amostrador de grande volume (AGV – PM_{2,5}), o ar é succionado para o interior de um abrigo a uma vazão de 1,13 m³/min e passa através de um filtro de 8''x10'' E55 de fibra de vidro que retém as partículas em suspensão. Neste caso a geometria da entrada da cabeça do amostrador favorece a coleta de apenas partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 µm. O controle de vazão e a estimativa da concentração de poluentes foi feita conforme relatado para as determinações de PTS e PM₁₀. Os materiais particulados foram estimados segundo as metodologias da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995, 1997).

Para as determinações de NO₂ e SO₂ foi utilizado um amostrador de pequenos volumes tipo Trigas. As coletas destes poluentes foram realizada apenas nas estações das comunidade de Parada, Pecém Pousada e Matões com frequência mensal e por um período de 24 h. O método utilizado baseia-se na absorção dos gases de interesse em soluções absorvedoras específicas.

Em funcionamento, no Trigas, o ar ambiente flui para a linha de amostragem do equipamento (semelhante a um funil invertido) conectado a uma mangueira flexível ligado a um pré-filtro para retirada de partículas e segue para um tubo distribuidor (*manifold*) de vidro que divide o fluxo em três partes. Cada fluxo é direcionado para um frasco borbulhador contendo a solução absorvente específica do gás poluente. As três vazões paralelas são reunidas em um tubo coletor (*manifold*) de aço inox conectado a uma única bomba a vácuo. O equipamento possui um gasômetro que registra o volume total de gás coletado.

Os frascos borbulhadores com as soluções absorventes são enviados para um laboratório acreditado para determinação das concentrações dos gases. Os gases NO₂ e SO₂ foram amostrados e analisados, respectivamente, pelos métodos do arsenito de sódio (US EPA – N° EQN-1277-026) e do peróxido de hidrogênio (ABNT NBR 12979:1993). Os métodos analíticos conseguem quantificar massas de SO₂ maiores que 6,40 µg e de NO₂ maiores que 0,290 µg. Caso a amostragem em 24 h não consiga acumular massa superior aos limites de quantificação, os resultados são apresentados como *NQ* (não quantificáveis).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Parâmetros meteorológicos

Os dados analisados correspondem aos períodos de amostragens na estação chuvosa (janeiro a junho) e na estação seca (julho a dezembro) do ano de 2022. As Tabelas 6 e 7 apresentam os dados meteorológicos mensais (precipitação pluviométrica, umidade relativa, temperatura e velocidade do vento) de cada período. Os dados foram obtidos a partir da estação automática agrometeorológica (3°34'13.98"S; 38°53'13.13"O. Datum: SIRGAS 2000) e da estação pluviométrica (3°33'15.12"S; 38°52'28.92"O. Datum: SIRGAS 2000) sob operação da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) em São Gonçalo do Amarante. No Ceará e em São Gonçalo do Amarante o período principal de chuvas envolve os meses de fevereiro a maio (FUNCEME, 2023).

Tabela 6 — Parâmetros meteorológicos da estação chuvosa na área em estudo

2022	Precipitação pluviométrica acumulada (mm)	Umidade relativa do ar (%)		Temperatura do ar (°C)		Velocidade média dos ventos (m/s)	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Janeiro	328,2	80,44	10,02	27,14	2,37	3,60	1,31
Fevereiro	89,8	81,58	8,98	27,43	2,20	3,20	1,55
Março	443,0	85,36	9,81	26,31	2,60	2,50	1,15
Abril	435,9	82,47	10,90	26,67	2,64	2,24	1,11
Maio	246,9	84,39	9,78	26,14	2,54	1,96	1,02
Junho	148,6	80,94	12,20	25,65	3,01	2,08	1,15

Fonte: Funceme (2023).

Tabela 7 — Parâmetros meteorológicos da estação seca na área em estudo

2022	Precipitação pluviométrica máxima (mm)	Umidade relativa do ar (%)		Temperatura do ar (°C)		Velocidade média dos ventos (m/s)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Julho	73,7	76,15	11,90	26,32	2,51	2,62	1,08
Agosto	4,0	75,21	10,37	26,52	2,32	3,54	1,10
Setembro	4,3	74,09	9,24	27,41	2,15	4,11	1,16
Outubro	2,5	72,61	10,45	27,87	2,25	4,28	1,23
Novembro	1,0	75,22	9,71	27,58	2,35	3,47	1,39
Dezembro	25,4	75,37	9,57	27,81	2,24	3,54	1,35

Fonte: FUNCEME (2023).

A Tabela 6 mostra que os meses de janeiro a junho (estação chuvosa) possuem alta precipitação pluviométrica, grande percentual de umidade relativa, temperatura relativamente constante e baixa intensidade de ventos, considerados os padrões climatológicos do estado do Ceará. Os meses de julho a dezembro (Tabela 7), na estação seca, mostram uma precipitação pluviométrica muito baixa (quase inexistente), queda de leve a moderada na umidade relativa do ar, leve aumento da temperatura e uma elevação da intensidade dos ventos, em relação ao período chuvoso, o que está de acordo com o perfil climatológico local e estadual. A edição mais recente das normais climatológicas lançada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é de 2022 e corresponde ao período de 1991 a 2020. O órgão não possui estação meteorológica no município de São Gonçalo do Amarante sendo a estação mais próxima a localizada no município de Fortaleza (INMET, 2022).

A FUNCEME mantém no município de São Gonçalo do Amarante uma estação meteorológica automática de instalação recente, sem uma série temporal que permita estabelecer a normal climatológica das variáveis meteorológicas. Para a precipitação pluviométrica, usando pluviômetros convencionais, o órgão dispõe de dados para o período de 1981 a 2010 (FUNCEME, 2023). A Tabela 8 apresenta as normais climatológicas de precipitação da FUNCEME no período de 1981 a 2010 para o município de São Gonçalo do Amarante e os do INMET para a cidade de Fortaleza no período de 1991 a 2020.

Tabela 8 — Normais climatológicas para as cidades de São Gonçalo do Amarante e Fortaleza

Mês	FUNCEME de 1981 a 2010 em São Gonçalo Precipitação pluviométrica (mm)	INMET de 1991 a 2020 em Fortaleza Umidade relativa do Ar (%)	INMET de 1991 a 2020 em Fortaleza Temperatura do ar (°C)	INMET de 1991 a 2020 em Fortaleza Velocidade média dos ventos (m/s)
Janeiro	95,9	78,4	27,4	2,7
Fevereiro	143,9	80,4	27,3	2,4
Março	259,3	83,0	27,0	2,0
Abril	223,7	85,1	26,8	1,9
Maio	117,8	82,6	26,8	2,2
Junho	68,7	79,9	26,4	2,6
Julho	27,5	76,9	26,2	2,8
Agosto	5,4	73,3	26,6	3,5
Setembro	4,7	71,7	27,0	3,8
Outubro	3,2	72,0	27,4	3,8
Novembro	3,1	72,7	27,7	3,6
Dezembro	26,3	74,4	27,8	3,4
Ano	979,5	77,5	27,0	2,9

Fonte: FUNCEME (2023) e INMET (2022).

Uma grande variedade de substâncias poluentes é lançada e encontrada na Atmosfera e estas sofrem influências relevantes das variáveis meteorológicas quanto as características de emissão, transporte, transformações químicas ocorridas e taxas de remoção e disposição. Parâmetros meteorológicos como precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar temperatura, velocidade do vento, influenciam diretamente no valor medido de cada poluente (WANG *et al.*, 2023).

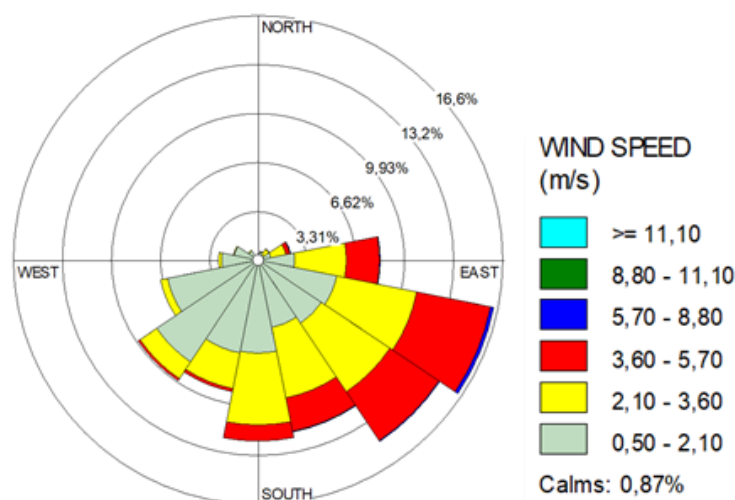
A deposição atmosférica abrange os processos úmido e seco de limpeza. Na deposição úmida a precipitação pluviométrica auxilia na remoção do poluente arrastando-o para a superfície terrestre. A deposição seca é um processo causado por difusão turbulenta, deposição gravitacional e difusão molecular na atmosfera sem precipitação, contribuindo para isso a umidade relativa, a temperatura, dentre outros (ZHOU *et al.*, 2021).

A variação da temperatura altera as concentrações de poluentes na atmosfera por influenciar na difusividade vertical e na umidade relativa do ar. Temperaturas mais altas contribuem para elevação do poluente aos níveis mais altos e temperaturas mais baixas tornam a trajetória dos poluentes próximas à superfície terrestre. A temperatura também atuar nos processos fotoquímicos provocando a formação de poluentes secundários (WANG *et al.*, 2023).

Os ventos promovem dois efeitos nos poluentes, a dispersão e a transformação. Em condições de ventos fortes os poluentes são removidos ou transportados. Quando em baixas velocidades ou calmaria tendem a influenciar a acumulação do poluente próximo a fonte de emissão; e contribui junto com a temperatura e a alta umidade relativa nas transformações dos poluentes (LIU *et al.*, 2023; ZHOU *et al.*, 2018).

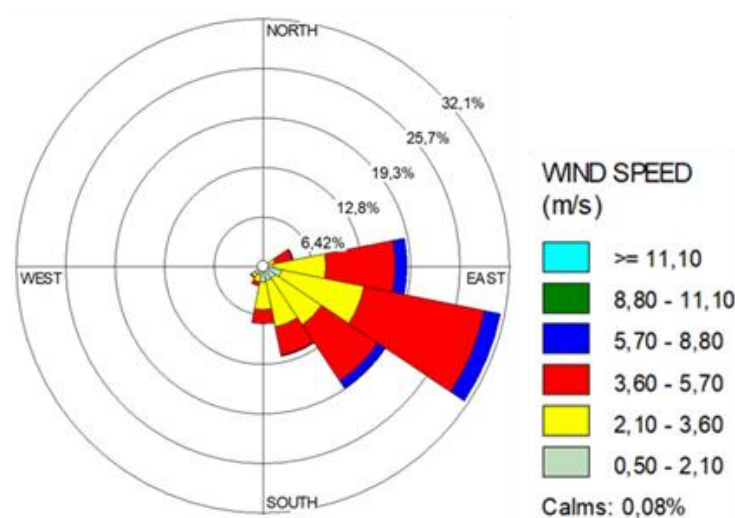
As Figuras 4 e 5 mostram os perfis de velocidade e direção dos ventos no período da estação chuvosa e no período da estação seca, respectivamente.

Figura 4 — Rosa dos ventos no período de janeiro a junho de 2022
(estação chuvosa) na área em estudo



Fonte: Autor (2023).

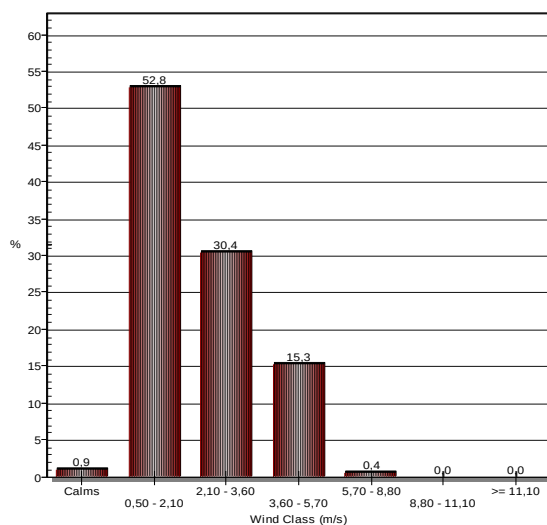
Figura 5 — Rosa dos ventos no período de julho a dezembro de 2022
(estação seca) na área em estudo



Fonte: Autor (2023).

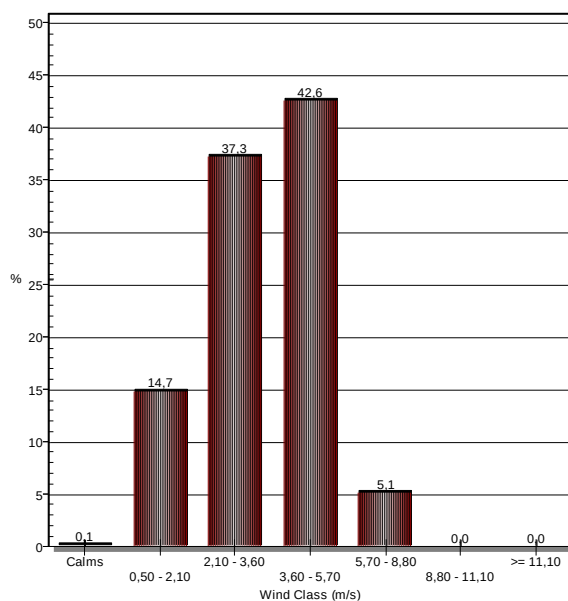
Na rosa dos ventos da Figura 4 (estação chuvosa), de janeiro a junho de 2022, se observa uma predominância de ventos de leste-nordeste de menor frequência e de maior frequência na direção sudeste-sul. Já na rosa dos ventos da Figura 5 (estação seca), de julho a dezembro de 2022, também se verifica a mesma predominância de ventos de leste-nordeste (menor frequência) e leste-sudeste (maior frequência). As Figuras 6 e 7 mostram as classes das velocidades dos ventos e suas frequências nas estações chuvosa e seca, respectivamente, na área do complexo industrial e portuário do Pecém.

Figura 6 — Distribuição de frequências da velocidade dos ventos no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área em estudo



Fonte: Autor (2023).

Figura 7 — Distribuição de frequências da velocidade dos ventos no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área em estudo

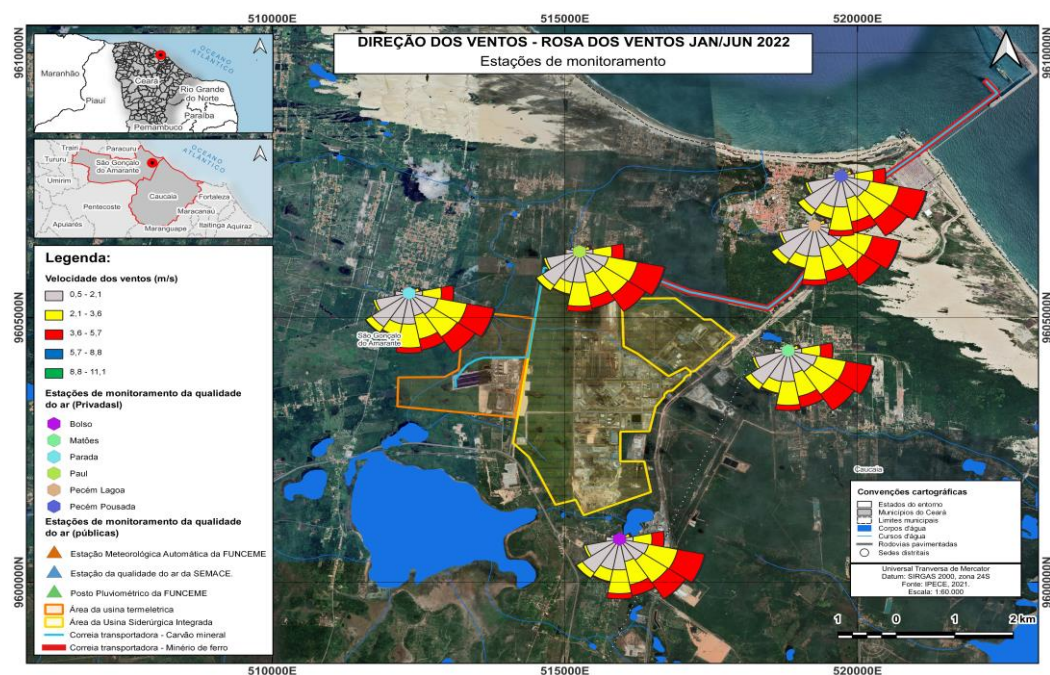


Fonte: Autor (2023).

No gráfico apresentado na Figura 6 se observa a predominância na estação chuvosa de ventos fracos, na faixa de 0,50 a 2,10 m/s (52,8 % de frequência) e na faixa de 2,10 a 3,60 m/s (30,4 % de frequência), com uma velocidade média para a estação chuvosa de 2,19 m/s. Na Figura 7 referente a estação seca, observa-se predominância de ventos fortes, na faixa de 2,10 a 3,6 m/s (37,3 % de frequência) e na faixa de 3,60 a 5,70 m/s (42,6 % de frequência), com velocidade média para a estação seca de 3,51 m/s.

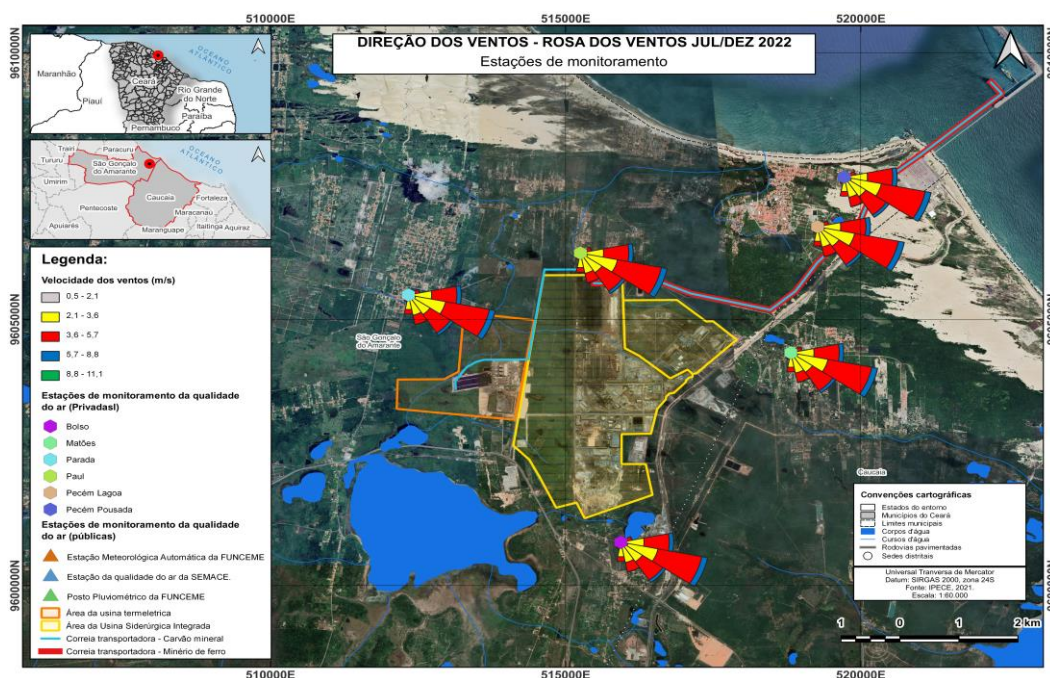
As Figuras 8 e 9 apresentam os perfis de ventos nos pontos de amostragem selecionados na área de estudo para os períodos correspondentes às estações chuvosa e seca, respectivamente.

Figura 8 — Rosa dos ventos localizadas nos pontos de amostragem da área de estudo no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa)



Fonte: Autor (2023).

Figura 9 — Rosa dos ventos localizadas nos pontos de amostragem da área de estudo no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca)



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 8 durante a estação chuvosa se observa que os ventos que chegam na estação Bolso não percorrem a área da usina siderúrgica, sofrendo, portanto, pouca ou quase nenhuma influência das emissões provenientes do complexo industrial. Na estação Matões os ventos possuem algumas direções que percorrem a área da usina siderúrgica, o que pode influenciar nos resultados medidos neste ponto de amostragem. Na estação Parada, a oeste da usina siderúrgica, os ventos que chegam percorrem de forma significativa as áreas da usina siderúrgica e da usina termelétrica, carreando os poluentes emitidos por essas empresas. Na estação Paul, assim como verificado na estação Parada, os ventos tendem a transportar de forma relevante a carga poluente das emissões das usinas termelétrica e siderúrgica e das correias transportadoras de minério de ferro e carvão mineral. Por fim, nas estações Pecém Pousada e Pecém Lagoa os ventos percorrem áreas da usina siderúrgica e das correias transportadoras de minério de ferro e de carvão mineral e da própria área do porto do Pecém, o que pode contribuir para uma elevação das concentrações de poluentes nestes sítios de amostragem.

Na estação seca (Figura 9), por sua vez, verifica-se que a estação Bolso continua sem sofrer influência dos ventos oriundos da usina siderúrgica, como observado também para a estação Matões. As estações Pecém Pousada e Pecém Lagoa permanecem sendo impactados pelas emissões da usina siderúrgica, das correias transportadoras de minério de ferro e carvão mineral e do porto do Pecém. As estações Parada e Paul ratificam a condição de em perspectiva serem os sítios mais impactados pelas emissões oriundas da usina siderúrgica, da usina termelétrica e das correias transportadoras de minério de ferro e carvão mineral.

Li *et al.* (2019b) realizaram estudo sobre a poluição por material particulado (PM) e suas relações com as condições meteorológicas em cidades chinesas no período de 2015 a 2017. Os resultados indicaram que as condições meteorológicas locais desempenham um papel importante na poluição por PM nas cidades.

Zambon Monte *et al.* (2016) investigaram as emissões de PM₁₀ na Região da Grande Vitória no estado do Espírito Santo. Os autores, a partir de um modelo de regressão logística, observaram a contribuição dos parâmetros meteorológicos (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação) sobre a qualidade do ar na região analisada. Nesta linha de investigação, Liu *et al.* (2013) relataram uma correlação das variações da temperatura com as concentrações de ozônio troposférico em Taiwan, na China.

Apesar das condições meteorológicas influenciarem nos processos físicos e químicos ocorridos com os poluentes na atmosfera, a qualidade do ar medida é resultante de uma variedade de fatores, tanto de escala, como do local estudado, sendo as avaliações sempre um caso particular (LIU *et al.*, 2023; PINEDA ROJAS *et al.*, 2020).

5.2. Monitoramento dos poluentes atmosféricos

As Tabelas 9 e 10 apresentam as estatísticas dos resultados das amostragens de PTS nas comunidades no entorno da área industrial em estudo no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) e no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca).

Tabela 9 — Estatísticas do monitoramento de PTS (24 h) no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo

Estação	Número amostras	Média aritmética	Desvio padrão	Concentração mínima (µg/m³)	Concentração máxima (µg/m³)
Bolso	28	29,25	11,84	12,57	69,54
Matões	28	31,26	17,82	14,54	109,23
Parada	28	37,96	12,89	23,18	80,94
Paul	28	39,68	16,27	19,20	79,00
Pecém	28	35,05	11,46	19,33	80,01
Pousada					
Pecém	28	32,62	13,02	15,90	86,46
Lagoa					

Fonte: Autor (2023).

Tabela 10 — Estatísticas do monitoramento de PTS (24 h) no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo.

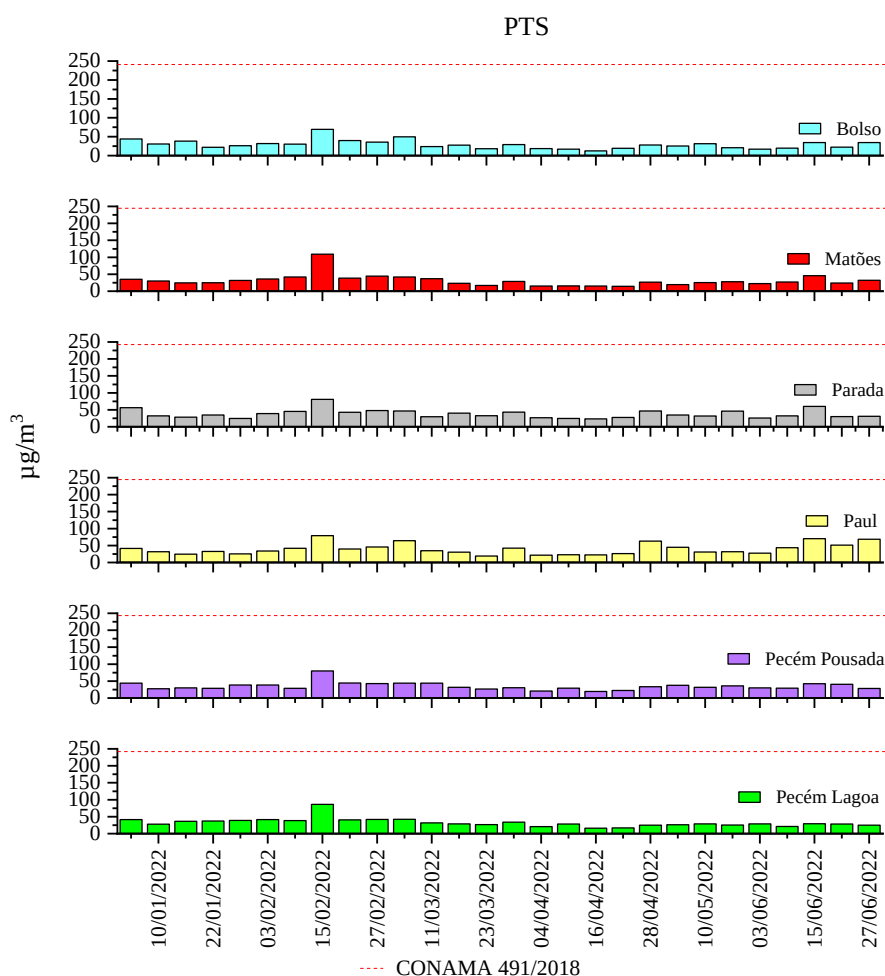
Estação	Número amostras	Média aritmética	Desvio padrão	Concentração mínima (µg/m³)	Concentração máxima (µg/m³)
Bolso	55	50,26	19,56	10,83	101,86
Matões	56	50,64	22,11	17,28	137,68
Parada	56	52,61	19,76	17,14	97,31
Paul	56	55,02	23,72	14,57	106,62
Pecém	56	44,69	18,40	17,01	94,53
Pousada					
Pecém	55	37,01	13,47	14,35	62,07
Lagoa					

Fonte: Autor (2023).

A partir das Tabelas 9 e 10 é possível observar que no período chuvoso o PTS apresentou menor valor na comunidade Bolso com $12,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o maior valor na comunidade Matões com $109,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No período seco o menor valor também foi encontrado na comunidade Bolso com $10,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o maior valor na comunidade Matões com $137,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Em geral, as médias se mostraram relativamente próximas em todas as comunidades nos dois períodos amostrados e dentro do padrão exigido pela legislação brasileira. A legislação brasileira é a única que apresenta padrão para o parâmetro de PTS.

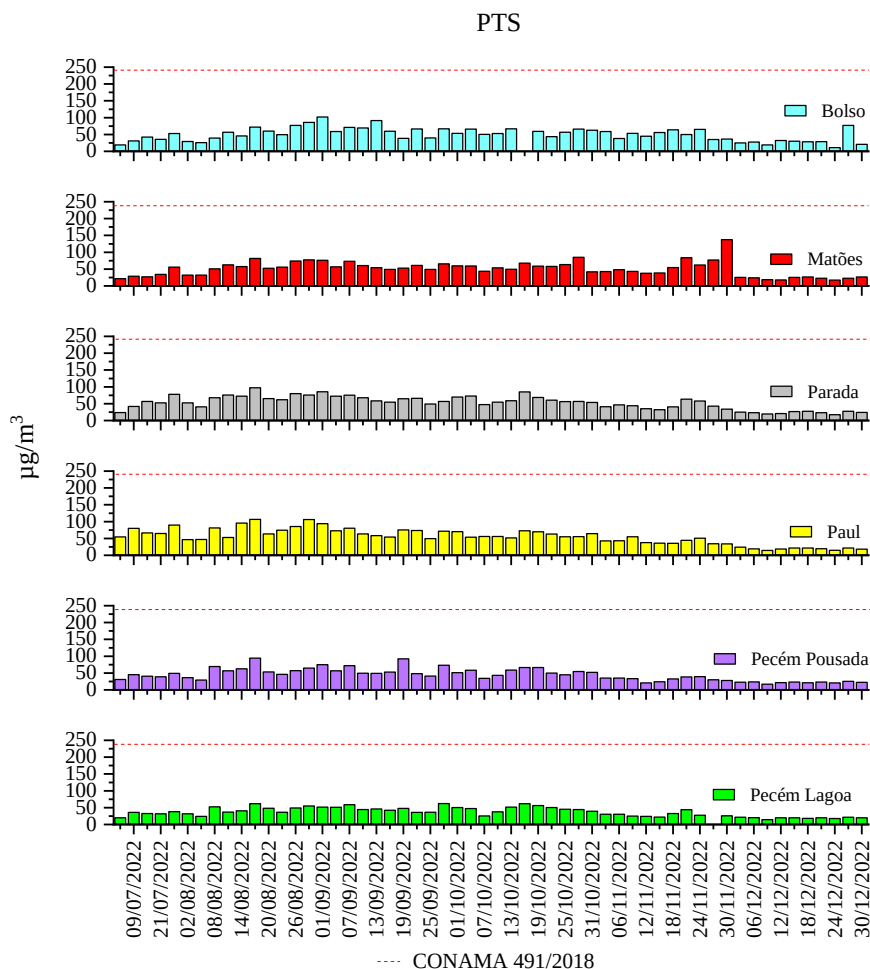
As Figuras 10 e 11 a seguir mostram as concentrações de PTS (24 h) em todos os pontos monitorados durante as estações chuvosa e seca na área em estudo, respectivamente. Os resultados obtidos foram comparados com o valor limite (PF) de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h) estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018.

Figura 10 — Concentrações de PTS (24 h) nos diferentes pontos de monitoramento da qualidade do ar no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo



Fonte: Autor (2023).

Figura 11 — Concentrações de PTS (24 h) nos diferentes pontos de monitoramento da qualidade do ar no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo



Fonte: Autor (2023).

Comparando as estações chuvosa e seca para as concentrações de PTS (Figuras 10 e 11) observa-se uma distribuição superior das concentrações deste particulado no período seco e nenhuma ultrapassagem do valor limite de PTS recomendado pela resolução CONAMA 491/2018 em ambas as estações climatológicas. Adicionalmente, relatam-se médias geométricas anuais de $36,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $37,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $42,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $42,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $37,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $36,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, nas comunidade de Bolso, Matões, Parada, Paul, Pecém Pousada e Pecém Lagoa, as quais são inferiores ao valor recomendado de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estabelecido pela resolução CONAMA 491/2018. Estes resultados confirmam a boa qualidade do ar para este poluente atmosférico.

As Tabelas 11 e 12 apresentam as estatísticas dos resultados das amostragens de PM₁₀ nas comunidades no entorno da área industrial em estudo no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) e no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca).

Tabela 11 — Estatísticas do monitoramento de PM₁₀ (24 h) no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo

Estação	Número amostras	Média aritmética	Desvio padrão	Concentração mínima (µg/m³)	Concentração máxima (µg/m³)
Bolso	28	18,21	8,95	8,16	55,26
Matões	28	18,55	9,83	10,29	59,98
Parada	28	20,94	10,14	12,42	62,91
Paul	28	20,32	10,07	10,1	58,81
Pecém	28	21,67	10,61	10,11	64,36
Pousada					
Pecém	28	19,13	10,48	8,34	64,45
Lagoa					

Fonte: Autor (2023).

Tabela 12 — Estatísticas do monitoramento de PM₁₀ (24 h) no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo

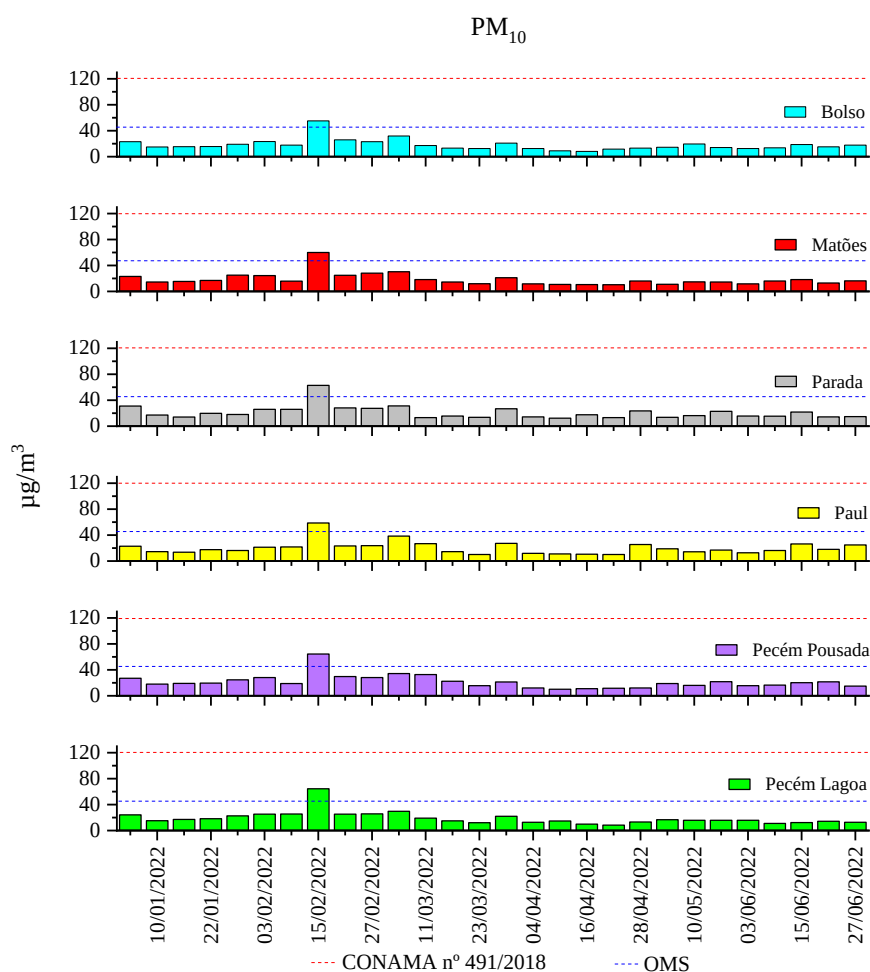
Estação	Número amostras	Média aritmética	Desvio padrão	Concentração mínima (µg/m³)	Concentração máxima (µg/m³)
Bolso	56	24,50	9,09	10,83	76,87
Matões	56	23,74	4,19	15,06	31,41
Parada	56	24,87	5,65	13,01	36,30
Paul	56	23,09	5,63	13,26	36,96
Pecém	56	22,46	4,88	14,38	33,09
Pousada					
Pecém	56	20,47	4,76	12,12	30,78
Lagoa					

Fonte: Autor (2023).

Nas Tabelas 11 e 12 observa-se que no período da quadra chuvosa o PM_{10} apresenta menor valor na comunidade Bolso com $8,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e valores mais altos nas comunidades Parada, Pecém Lagoa e Pecém Pousada correspondente a uma faixa de $62,9$ a $64,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No período seco o menor e maior valor encontrado quando se comparam todas os sítios monitorados foram observados na comunidade Bolso com concentrações de $10,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $76,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Notadamente as comunidades Parada e Bolso são localidades mais e menos afetadas pelos regimes de vento locais.

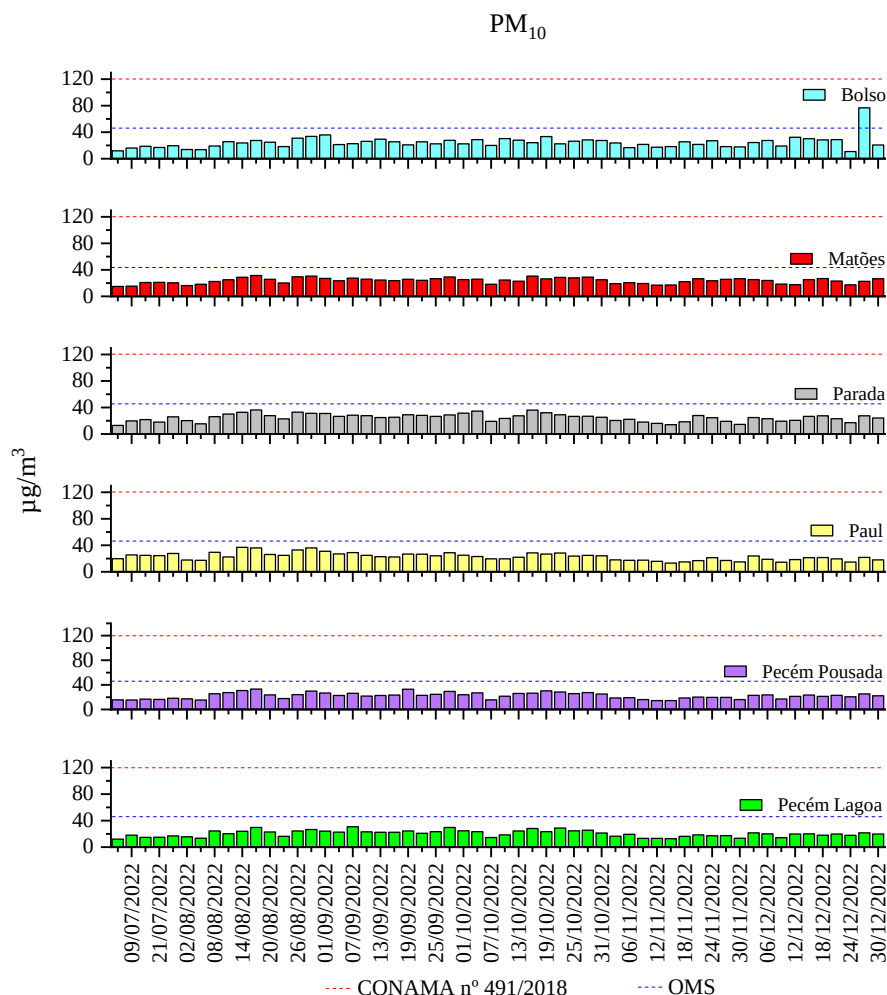
As Figura 12 e 13 mostram as concentrações de PM_{10} nos dias amostrados em todos os pontos monitorados durante todo o período do estudo no ano de 2022. Os resultados obtidos foram comparados com o valor intermediário inicial (PI-1) de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h) estabelecido pela Resolução CONAMA nº 491/2018 e de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h) recomendado pela OMS.

Figura 12 — Concentrações de PM_{10} (24 h) nos diferentes pontos de monitoramento da qualidade do ar no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo



Fonte: Autor (2023).

Figura 13 — Concentrações de PM_{10} (24 h) nos diferentes pontos de monitoramento da qualidade do ar no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo



Fonte: Autor (2023).

As médias aritméticas das concentrações de PM_{10} se apresentaram em sua totalidade abaixo do valor limite recomendado pela resolução CONAMA nos períodos chuvoso e seco e em apenas uma coleta (dia 15/02), no período chuvoso, os valores em todas as localidades foram superiores ao valor recomendado pela OMS (Figura 12). Particularmente, o resultado da coleta do dia 27/12 na estação Bolso mostrou níveis de PM_{10} acima do limite da OMS, porém neste caso essa ultrapassagem pode ter sido influenciada pela ocorrência de uma “queimada” em área vizinha ao sítio de monitoramento, segundo o relatório de automonitoramento entregue ao órgão de meio ambiente Estadual. Adicionalmente, relatam-se médias aritméticas anuais de PM_{10} de 21,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 21,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 22,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 21,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 22,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 19,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nas comunidade de Bolso, Matões, Parada, Paul, Pecém Pousada e Pecém Lagoa, as quais são inferiores ao valor recomendado de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ definido pela resolução CONAMA 491/2018.

Estes resultados confirmam a boa qualidade do ar em todo o período de monitoramento para o PM_{10} , como também já observado para as concentrações de PTS.

Analizando as Tabelas 9 e 10 para PTS e Tabelas 11 e 12 para PM_{10} observa-se uma grande amplitude nas concentrações máxima e mínima e elevados valores dos desvios padrões das determinações, evidenciando uma ampla variabilidade nos valores das concentrações, o que pode estar associado a um processo produtivo em várias etapas e grandes movimentações de matéria e energia.

As Tabelas 13 e 14 apresentam as estatísticas dos resultados das amostragens de $PM_{2.5}$ nas comunidades no entorno da área industrial em estudo no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) e no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca).

Tabela 13 — Estatísticas do monitoramento de $PM_{2.5}$ (24 h) no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo

Estação	Número amostras	Média aritmética	Desvio padrão	Concentração mínima ($\mu g/m^3$)	Concentração máxima ($\mu g/m^3$)
Bolso	28	9,27	3,89	3,65	21,61
Matões	28	10,27	5,26	4,52	30,87
Parada	28	11,32	4,80	4,89	25,32
Paul	28	11,36	5,02	5,86	28,14
Pecém	28	9,70	4,04	4,45	20,72
Pousada					
Pecém	28	8,23	2,52	4,07	14,48
Lagoa					

Fonte: Autor (2023).

Tabela 14 — Estatísticas do monitoramento de PM_{2.5} (24 h) no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo

Estação	Número amostras	Média aritmética	Desvio padrão	Concentração mínima (µg/m ³)	Concentração máxima (µg/m ³)
Bolso	56	11,87	7,80	5,21	63,96
Matões	56	11,35	2,74	6,03	18,23
Parada	56	9,99	3,22	3,47	16,97
Paul	56	13,26	4,80	5,37	24,49
Pecém	56	7,07	2,21	2,78	15,01
Pousada Pecém	55	8,00	2,56	3,95	13,99
Lagoa					

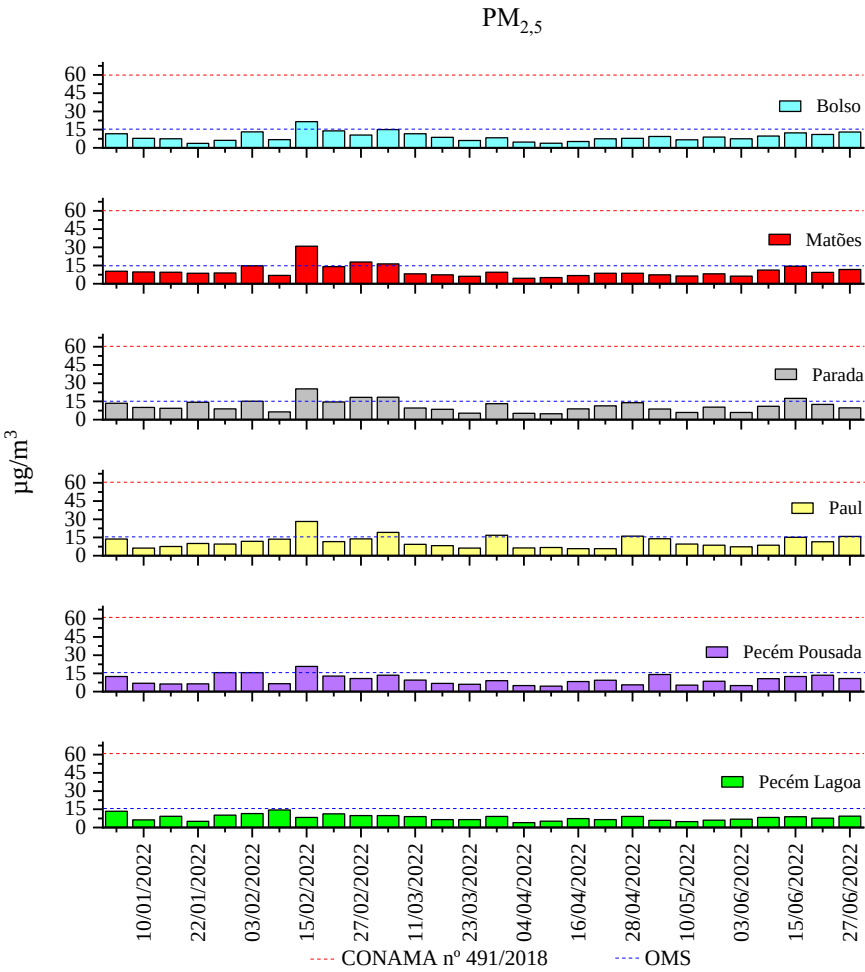
Fonte: Autor (2023).

Como anteriormente observado para o PM₁₀ no período da quadra chuvosa o PM_{2.5} apresentou menor valor na comunidade Bolso com 3,65 µg/m³ e o maior valor na comunidade Matões com 30,87 µg/m³. No período seco o menor valor foi encontrado na comunidade Pecém Pousada com 2,78 µg/m³ e o maior valor na comunidade Bolso com 63,96 µg/m³, provavelmente sobre efeito da queimada local ocorrida próxima a essa estação de monitoramento.

Assim como observado para o PTS e PM₁₀, as Tabelas 13 e 14 ratificaram as grandes amplitudes nas concentrações máxima e mínima e valores menores, mas ainda significativos, dos desvios padrões, confirmando uma ampla variabilidade nos valores das concentrações e concentrações máximas funcionando como *outliers* na análise geral dos dados.

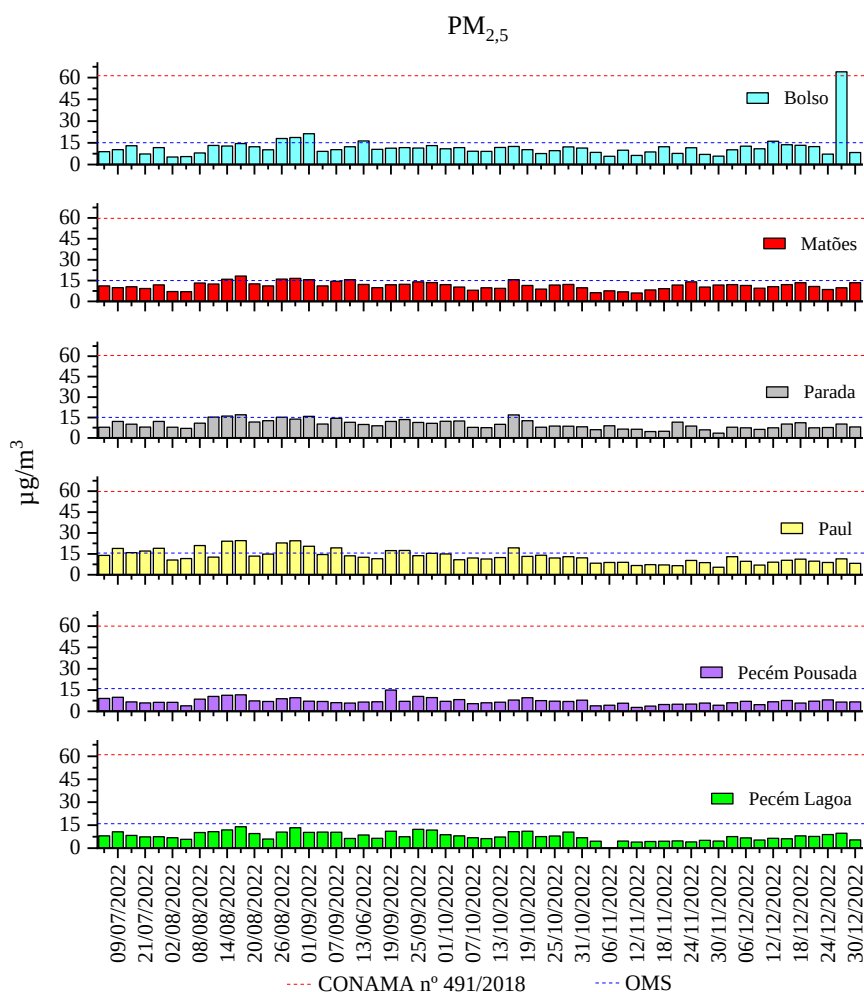
As Figuras 14 e 15 mostram as concentrações de PM_{2.5} nos dias amostrados em todos os pontos monitorados durante o período do estudo no ano de 2022. Os resultados obtidos foram comparados com o valor intermediário inicial (PI-1) de 60 µg/m³ (24 h) estabelecido pela Resolução CONAMA nº 491/2018 e de 15 µg/m³ (24 h) recomendado pela OMS.

Figura 14 — Concentrações de PM_{2,5} das amostragens da rede de monitoramento da qualidade do ar no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa).



Fonte: Autor (2023).

Figura 15 — Concentrações de $PM_{2.5}$ das amostragens da rede de monitoramento da qualidade do ar no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca).



Fonte: Autor (2023).

Nas Figuras 14 e 15 para o períodos chuvoso e seco todas as concentrações observadas apresentaram-se em conformidade com o disposto na resolução CONAMA 491/2018 para o $PM_{2.5}$ ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Adicionalmente, relatam-se médias aritméticas anuais de $PM_{2.5}$ de $10,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $10,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $10,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $12,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $8,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $8,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, nas comunidades de Bolso, Matões, Parada, Paul, Pecém Pousada e Pecém Lagoa, as quais são inferiores ao valor recomendado de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ definido pela resolução CONAMA 491/2018.

Por outro lado, em vários dias do monitoramento os valores médios e diários de $PM_{2.5}$ apresentaram-se em discordância com o valor-guia bem mais restritivo de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ definido pela OMS. No período chuvoso o valor recomendado pela OMS foi ultrapassado em 3 coletas nas comunidades de Bolso, Matões e Pecém Pousada, em 5 coletas na comunidade Parada e 6 coletas na comunidade Paul.

Já no período seco, e de ventos mais fortes, estas ultrapassagens foram bem mais significativas, relatando-se valores superiores a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 06 coletas nas localidades de Bolso e Parada, em 7 coletas na estação de Matões e em 15 coletas na localidade de Paul. A frequência de ultrapassagem de 10% no sítio de Bolso, considerando o regime de ventos locais e a localização da estação de monitoramento pode estar relacionada a emissões de outras fontes de outros empreendimentos. A frequência de ultrapassagem de 12% no sítio Matões mostram o impacto das emissões de poluentes advindos da usina siderúrgica, enquanto as frequências de 10% e 25% nas comunidades de Parada e Paul, respectivamente, são muito influenciadas pela termelétrica, também pela siderúrgica e ainda pelas correias transportadoras de minério de ferro e de carvão mineral.

Em geral estes resultados alertam para condições de perigo a saúde das pessoas que vivem nestes locais e corroboram com os relatos das populações locais que reclamam dos incômodos dos poluentes ambientais oriundos das emissões do CIPP. Em reportagem veiculada em outubro de 2019 (estação seca) por um jornal de grande circulação local moradores da comunidade de Parada monitorada neste estudo denunciaram os problemas oriundos da fuligem do carvão mineral que é transportado nas esteiras que ligam a usina siderúrgica ao porto do Pecém, a qual se acumula em volumes apreciáveis em suas residências (DIÁRIO DO NORDESTE, 2019).

Os materiais particulados provenientes de emissões de usinas siderúrgicas integradas são uma mistura complexa das fontes pontuais e fugitivas das várias operações unitárias e dos processos de transformação, merecendo destaque as presenças de PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$ atmosférico. O PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$ são caracterizados como particulados inaláveis, indo até os alvéolos pulmonares, e apresentam forte impacto na saúde humana, sendo responsáveis pelo aumento das taxas de mortalidade e morbidade causadas por doenças respiratórias e cardiovasculares (ALMEIDA *et al.*, 2015; JIA *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2022).

Da Costa e Costa (2021) avaliaram concentrações de PTS em estudo feito entre agosto e setembro de 2019 (período seco) na área do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) envolvendo a comunidade de Parada e uma estação próxima as comunidades de Pecém Pousada e Pecém Lagoa. O autores relataram valores de média aritmética mensal de $53,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $51,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, nestas localidades. Notadamente a concentração de PTS no sítio Parada em 2019 foi muito próxima da média semestral de $52,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ encontrada neste trabalho.

Ferreira Júnior (2016) realizou no período seco entre outubro e dezembro de 2015 estudos de monitoramento de poluentes atmosférico em uma área urbana na cidade de São Gonçalo do Amarante nas proximidades do CIPP e obteve para o PTS média de $48,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a qual se apresenta similar as concentrações observadas neste trabalho.

Souza *et al.* (2019) em estudo sobre qualidade do ar e saúde da população apresentaram dados de 2015 de várias estações de monitoramento da qualidade do ar no município de Volta Redonda no estado do Rio de Janeiro. Os autores relatam valores médios de PTS e PM_{10} no entorno de uma grande companhia siderúrgica entre 67 e $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PTS e entre $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} .

Tavares (2019) realizou em 2015 monitoramento da qualidade do ar no Largo do Bodegão na localidade de Santa Cruz, município do Rio de Janeiro, nas proximidades de uma usina siderúrgica, relatando médias de PTS de $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e de PM_{10} de $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

De Carvalho; Rocha e Finamore (2021) realizam monitoramento de $\text{PM}_{2,5}$ em dois sítios próximos a empreendimento siderúrgicos, envolvendo as comunidades de Santa Cruz no Rio de Janeiro e Piquiá de Baixo em Açailândia no Maranhão no período de novembro de 2016 a julho de 2017. Em 2016 a média de $\text{PM}_{2,5}$ para Pequiá foi de $22,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e para Santa Cruz foi $14,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e em 2017 estas concentrações foram de $18,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $31,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Amostras coletadas de PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ por Almeida *et al.* (2015) em área próxima a uma siderúrgica integrada no norte da Espanha apresentaram média de $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o PM_{10} e $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o $\text{PM}_{2,5}$.

Di Gilio *et al.* (2017) realizaram amostragens em 7 pontos na área industrial de Taranto, Itália no período de janeiro a julho de 2011, sendo 4 deles próximo a uma siderúrgica integrada. Os valores encontrados (médias) para as amostragens de PM_{10} próximo a usina variaram de $35,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $54,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; sendo apresentados picos de $159,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $271,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

As Tabelas 15 e 16 apresentam as estatísticas dos resultados das amostragens de SO_2 e NO_2 nas comunidades no entorno da área industrial em estudo no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) e no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca). As amostragens ocorreram com periodicidade mensal e apenas nas estações das comunidades Parada, Pecém Pousada e Matões, como relatado anteriormente.

Tabela 15 — Estatísticas do monitoramento de SO₂ e NO₂ (24 h) no período de janeiro a junho de 2022 (estação chuvosa) na área do complexo industrial em estudo

SO ₂				NO ₂			
Data	Parada (µg/m ³)	Pecém Pousada (µg/m ³)	Matões (µg/m ³)	Data	Parada (µg/m ³)	Pecém Pousada (µg/m ³)	Matões (µg/m ³)
16/01/2022	NQ	NQ	NQ	16/01/2022	NQ	NQ	NQ
15/02/2022	NQ	NQ	NQ	15/02/2022	NQ	NQ	NQ
17/03/2022	NQ	NQ	NQ	17/03/2022	NQ	NQ	NQ
10/04/2022	NQ	NQ	NQ	10/04/2022	NQ	NQ	5,15
16/05/2022	NQ	NQ	NQ	16/05/2022	NQ	NQ	NQ
15/06/2022	NQ	NQ	NQ	15/06/2022	NQ	NQ	NQ

Valor Resolução CONAMA nº 491/2018: SO₂ = 125 µg/m³ (24 h) no PI-1, 20 µg/m³ (24 h) no PF e 40 µg/m³ (anual) no PI-1. Valor Resolução CONAMA nº 491/2018: NO₂ = 260 µg/m³ (1 h) no PI-1, 60 µg/m³ (anual) no PI-1 e 40 µg/m³ (anual) no PF. Valor-guia da OMS: SO₂ = 40 µg/m³ (24 h). Valor-guia da OMS NO₂ = 25 µg/m³ (24 h). 10 µg/m³ (anual). NQ – Não Quantificável.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 16 — Estatísticas do monitoramento de SO₂ e NO₂ (24 h) no período de julho a dezembro de 2022 (estação seca) na área do complexo industrial em estudo

SO ₂				NO ₂			
Data	Parada (µg/m ³)	Pecém Pousada (µg/m ³)	Matões (µg/m ³)	Data	Parada (µg/m ³)	Pecém Pousada (µg/m ³)	Matões (µg/m ³)
15/07/2022	NQ	NQ	NQ	15/07/2022	NQ	NQ	NQ
20/08/2022	33,5	NQ	NQ	20/08/2022	NQ	NQ	NQ
13/09/2022	NQ	NQ	18,7	13/09/2022	NQ	NQ	NQ
19/10/2022	23,9	NQ	14,1	19/10/2022	NQ	5,76	NQ
12/11/2022	NQ	NQ	NQ	12/11/2022	NQ	NQ	NQ
15/12/2022	NQ	NQ	NQ	15/12/2022	NQ	NQ	NQ

Valor Resolução CONAMA nº 491/2018: SO₂ = 125 µg/m³ (24 h) no PI-1, 20 µg/m³ (24 h) no PF e 40 µg/m³ (anual) no PI-1. Valor Resolução CONAMA nº 491/2018: NO₂ = 260 µg/m³ (1 h) no PI-1, 60 µg/m³ (anual) no PI-1 e 40 µg/m³ (anual) no PF. Valor-guia da OMS: SO₂ = 40 µg/m³ (24 h). Valor-guia da OMS NO₂ = 25 µg/m³ (24 h). 10 µg/m³ (anual). NQ – Não Quantificável.

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 15 observa-se que quase todas as amostragens para SO₂ e NO₂ se mostraram com valores não quantificáveis (*NQ*) para as emissões no período chuvoso, a exceção de uma coleta no dia 10/04/2022 na comunidade Matões que mostrou 5,15 µg/m³ de NO₂, o qual é um valor bem inferior a qualquer limite de ocorrência definido pelas legislações do CONAMA e da OMS. Na Tabela 16, no período seco, apenas duas amostras nas comunidades Matões e duas na comunidade Parada apresentam valores quantificáveis para o parâmetro SO₂. Para o NO₂ somente uma amostra na comunidade Pecém Pousada foi quantificada. Em todos os casos de quantificação os valores se mostraram dentro do padrão exigido pela legislação brasileira e do valor-guia da OMS.

Na área do CIPP, Da Costa e Costa (2021) encontraram na comunidade da Parada, em São Gonçalo do Amarante uma concentração média 5,3 µg/m³ de NO₂ entre agosto e setembro de 2019. Este valor é similar ao encontrado nesta pesquisa. Ferreira Júnior (2016) em seus estudos na área urbana de São Gonçalo do Amarante não detectou concentrações mensuráveis de NO₂ enquanto a média para SO₂ entre outubro e dezembro de 2015 foi de 2,83 µg/m³.

6 CONCLUSÕES

O monitoramento das emissões atmosféricas e da qualidade do ar nas áreas impactadas pelo Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) mostrou que as concentrações dos materiais particulados (PTS, PM₁₀ e PM_{2,5}) se encontram dentro dos valores permitidos pela resolução CONAMA vigente no país.

As concentrações de SO₂ e NO₂ em todo o período do estudo se apresentaram na maioria das coletas não quantificáveis. As concentrações quando quantificadas variaram entre 5,15 µg/m³ a 5,76 µg/m³ para o NO₂ e 14,1 µg/m³ a 33,5 µg/m³ para o SO₂. Em todas as detecções, para ambos os gases, os valores encontrados são bem inferiores aos limites recomendados pela legislação brasileira e OMS.

Considerado o regime de ventos locais (velocidade e direção) observa-se que as comunidades Bolso e Matões no período chuvoso e seco são pouco influenciadas pelas atividades da usina siderúrgica, ao contrário do verificado nas comunidades Pecém Pousada e Pecém Lagoa que são influenciadas por esta usina e principalmente pelas correias transportadoras de minérios de ferro e carvão. De forma mais intensa, as comunidades de Parada e Paul apresentam-se sob maior impacto das emissões de particulados provenientes da usina siderúrgica, termelétrica e correias transportadoras de matérias-primas.

A partir das concentrações dos poluentes monitorados e dos perfis de qualidade do ar, infere-se que em geral os dispositivos de controle da poluição do ar empregados nos processos da empresa siderúrgica/termelétrica estão funcionando adequadamente para o atendimento aos parâmetros da legislação atmosférica nacional vigente, o que confirma a boa qualidade do ar no período do estudo para todos os parâmetros monitorados.

Em contraponto a legislação nacional os valores guias estabelecidos pela OMS para as partículas inaláveis (PM₁₀ e PM_{2,5}) foram ultrapassadas várias vezes durante todo o ano de 2022, principalmente nas comunidades de Bolso, Matões, Parada e Paul no período seco, o que desponta para a necessidade de avaliação específica das emissões e controle destes poluentes.

REFERÊNCIAS

ABDUL QUADER, M. *et al.* Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient ultra-low carbon dioxide (CO₂) steelmaking (ULCOS) program. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 537–549, 2016.

ALMEIDA, S. M. *et al.* Chemical characterization of atmospheric particles and source apportionment in the vicinity of a steelmaking industry. **Science of the Total Environment**, v. 521–522, p. 411–420, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13412**: Material em suspensão na atmosfera - Determinação da concentração de partículas inaláveis pelo método do amostrador de grande volume acoplado a um separador inercial de partículas. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9547**: Material particulado em suspensão no ar ambiente - Determinação da concentração total pelo método do amostrador de grande volume. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO DAS EMPRESAS DO COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM – AECIPP. Disponível em <https://www.aecipp.com.br/pt-br/cipp>. Acesso em 10 de setembro de 2023.

BLAY, V.; BARRIOS RIVAS, J. L.; XIAO, Z. Separation of air components and pollutants by the Earth's gravitational field. **Chemosphere**, v. 232, p. 453–461, 2019.

BRASIL. Decreto-Lei nº. 1.413, de 14 de agosto de 1975. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 1975.

BRASIL. Lei Federal nº. 6.803, de 2 de julho de 1980. Dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial nas áreas críticas de poluição, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 1980.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 1986.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 1989.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 1990a.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 8, de 6 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. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 1990b.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 2006.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 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 02 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 2018.

BRASIL. Lei Federal nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 1981.

CHENG, X. L. *et al.* Generation of polycyclic aromatic hydrocarbons during coking. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 17, n. 12, p. 6–10, 2010.

CHUN, T. *et al.* Novel technology of reducing SO₂ emission in the iron ore sintering. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 105, p. 297–302, 2017.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Estudo dos compostos orgânicos voláteis (COVS) na atmosfera do município de Paulínia - SP**. 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**, 2022.

CRAIG, I. K.; CAMISANI-CALZOLARI, F. R.; PISTORIUS, P. C. A contemplative stance on the automation of continuous casting in steel processing. **Control Engineering Practice**, v. 9, n. 9, p. 1013–1020, 2001.

DA COSTA, E. S.; COSTA, A. A. Estudo do Transporte de Poluentes Atmosféricos no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 615–624, 2021.

DE CARVALHO, L. V. B.; ROCHA, F.; FINAMORE, R. Environmental surveillance of the steel industry by the people: The experiences of Piquiá de Baixo (MA) and Santa Cruz (RJ). **Ciencia e Saúde Coletiva**, v. 26, p. 3635–3645, 2021.

DE OLIVEIRA CARNEIRO, L. *et al.* Improving H₂S removal in the coke oven gas purification process. **Separation and Purification Technology**, v. 257, n. 15, 117862, 2021.

DERISIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 4 ed., São Paulo: Editora Oficina de textos, 2012.

DIÁRIO DO NORDESTE. Moradores do Pecém voltam a sofrer com fuligem de carvão mineral da CSP. *Jornal Diário do Nordeste*, Fortaleza, 28 out. 2019, 18:47 Negócios. Disponível em <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/negocios/online/moradores-do-pecem-voltam-asofrer-com-fuligem-de-carvao-mineral-da-csp-1.2167561>. Acesso em 15 out. 2023.

DI GILIO, A. *et al.* An intensive monitoring campaign of PAHs for assessing the impact of a steel plant. **Chemosphere**, v. 168, p. 171–182, 2017.

DONG, J. *et al.* Atmospheric ammonia in China: Long-term spatiotemporal variation, urban-rural gradient, and influencing factors. **Science of the Total Environment**, v. 883, 163733, 2023.

DUFFY, J. J.; MAHONEY, M. R.; STEEL, K. M. Influence of thermoplastic properties on coking pressure generation: Part 1 - A study of single coals of various rank. **Fuel**, v. 89, n. 7, p. 1590–1599, 2010.

EEA. European Environment Agency. **Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, 2008**.

ERTEM, M. E.; GÜRGEN, S. Energy balance analysis for Erdemir blast furnace number one. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 11–12, p. 1139–1148, 2006.

FAN, X. *et al.* Review on CO terminal treatment technologies in steel industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 418, 138231, 2023.

FARIAS NETO, G. W. *et al.* Optimizing the coke oven process by adjusting the temperature of the combustion chambers. **Energy**, v. 217, 119419, 2021.

FERREIRA JÚNIOR, A. C. **Avaliação da Qualidade do Ar no Município de São Gonçalo do Amarante/CE**. 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. 2016.

FERREIRA LEMOS, M. C. *et al.* The environmental monitoring of air pollution in the Santa Cruz industrial district of Rio de Janeiro using a plant fertility model. **Environmental Pollution**, v. 316, n. October 2022, 2023.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS – FUNCEME. **Plataforma de Coleta de Dados**. Disponível em <https://www.funceme.br/pcd/estacoes>. Acesso em 15 de março de 2023.

GUILHERME, V. S.; CASTRO, J. A. Utilização de gás de coqueria na sinterização de minério de ferro. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 3, p. 357–362, 2012.

GÜR, T. M. Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization: Review of materials, processes and technologies. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 89, 100965, 2022.

HAN, D. *et al.* Distribution and emissions of trace elements in coal-fired power plants after ultra-low emission retrofitting. **Science of the Total Environment**, v. 754, 142285, 2021.

HASANBEIGI, A.; ARENS, M.; PRICE, L. Alternative emerging ironmaking technologies for energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction: A technical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 645–658, 2014.

HOEFS, J.; HARMON, R. The Earth's atmosphere - A stable isotope perspective and review. **Applied Geochemistry**, v. 143, 105355, 2022.

HOU, S. S. *et al.* Firing blast furnace gas without support fuel in steel mill boilers. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 7, p. 2758–2767, 2011.

HSU, C. Y. *et al.* Using hybrid methodologies to characterize temporal behavior and source of ambient ammonia. **Atmospheric Pollution Research**, v. 14, n. 2, 101663, 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020**. Brasília, DF, 2022.

INSTITUTO DE ESTUDOS E PESQUISAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ - INESP. **Cenário Atual do Complexo Industrial e Portuário do Pecém**. Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos – CAECE, Fortaleza, 2013.

JEONG, B. K.; BANG, G. H.; KANG, Y. B. Role of liquid and solid particles in solid-liquid mixed fluxes on sulfur removal from molten iron under centrifugal stirring by an impeller. **Powder Technology**, v. 396, p. 1–12, 2022.

Ji, Z. *et al.* Characteristics of PM_{2.5} from iron ore sintering process: Influences of raw materials and controlling methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 12–22, 2017.

Ji, Z. *et al.* Insight into a novel technique to regulate the emission profile of hazardous PM_{2.5} during iron ore sintering process. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 133, p. 88–96, 2020.

JIA, J. *et al.* Emission characteristics and chemical components of size-segregated particulate matter in iron and steel industry. **Atmospheric Environment**, v. 182, p. 115–127, 2018.

JIANG, H. *et al.* Exhaust aftertreatment device-derived ammonia emissions from conventional and hybrid light-duty gasoline vehicles over different driving cycles. **Journal of Hazardous Materials**, v. 458, p. 131914, 2023.

KLIMEŠ, L. *et al.* Dry cooling as a way toward minimisation of water consumption in the steel industry: A case study for continuous steel casting. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, 2020.

- LAU, L. L. *et al.* Trace elements emission in iron ore sintering: A review. **Environmental Advances**, v. 6, p. 100123, 2021.
- LI, J. *et al.* The ignored emission of volatile organic compounds from iron ore sinter process. **Journal of Environmental Sciences**, v. 77, p. 282–290, 2019.
- LI, K. *et al.* The evolution of structural order, microstructure and mineral matter of metallurgical coke in a blast furnace: A review. **Fuel**, v. 133, n. 30, p. 194–215, 2014.
- LI, N. *et al.* Progress and prospects of photocatalytic conversion of low-concentration NO_x. **Chinese Journal of Catalysis**, v. 43, n. 9, p. 2363–2387, 2022.
- LI, X. *et al.* Particulate matter pollution in Chinese cities: Areal-temporal variations and their relationships with meteorological conditions (2015–2017). **Environmental Pollution**, v. 246, p. 11–18, 2019b.
- LIU, W. *et al.* The production and application of hydrogen in steel industry. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 17, p. 10548–10569, 2021.
- LIU, X. *et al.* A comprehensive investigation of PM_{2.5} in the Huaihe River Basin, China: Separating the contributions from meteorology and emission reductions. **Atmospheric Pollution Research**, v. 14, n. 1, p. 101647, 2023.
- MU, L. *et al.* Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from coking industries in China. **Particuology**, v. 11, n. 1, p. 86–93, 2013.
- ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE - OPAS. **Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: partículas inaláveis (MP_{2,5} e MP₁₀), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono**. Resumo executivo. Washington, D.C.: Organização Pan-Americana da Saúde; 2021.
- PINEDA ROJAS, A. L. *et al.* High PM₁₀ concentrations in the city of Buenos Aires and their relationship with meteorological conditions. **Atmospheric Environment**, v. 241, 117773, 2020.
- PINTO, R. G. D.; SZKLO, A. S.; RATHMANN, R. CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—from structural to intensity effects. **Energy Policy**, v. 114, p. 380–393, 2018.
- PUGH, D. *et al.* Thermal distributive blast furnace gas characterisation, a steelworks case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 53, n. 2, p. 358–365, 2013.
- QIAN, L. *et al.* Emission reduction research and development of PCDD/Fs in the iron ore sintering. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 82–91, 2018.
- RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos siderúrgicos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005.
- RIZZO, E. M. S. **Análise da sustentabilidade dos processos siderúrgicos**. Vila Velha: E. R. Consultoria e Treinamento Ltda, 2015.

SANTA-MARINA, L. *et al.* Characterization of PCDD/F and dl-PCB levels in air in Gipuzkoa (Basque Country, Spain). **Environmental Research**, v. 228, 115901, 2023.

SANTOS, L. M. M. **Avaliação ambiental de processos industriais**. 4ª ed. São Paulo: Editora Oficina de textos, 2011.

SCHRAMA, F. N. H. *et al.* Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 44, n. 5, p. 333–343, 2017.

SHEN, J. *et al.* Occurrence, profiles, and control of unintentional POPs in the steelmaking industry: A review. **Science of the Total Environment**, v. 773, p. 145692, 2021a.

SHEN, J. *et al.* Future CO₂ emission trends and radical decarbonization path of iron and steel industry in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 326, n. October, p. 129354, 2021b.

SHEN, Y. S. *et al.* Three-dimensional modelling of in-furnace coal/coke combustion in a blast furnace. **Fuel**, v. 90, n. 2, p. 728–738, 2011.

SOUZA, L. C. J. *et al.* A poluição em Volta Redonda : Uma revisão sobre a qualidade do ar e a saúde da população. **Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico**, v. 5, n. 5, p. 253–271, 2019.

SUN, Q. *et al.* Concurrent measurements of atmospheric ammonia concentrations in the megacities of Beijing and Shanghai by using cavity ring-down spectroscopy. **Atmospheric Environment**, v. 307, 119848, 2023.

SUN, W. *et al.* Assessment of multi-air emissions: Case of particulate matter (dust), SO₂, NO_x and CO₂ from iron and steel industry of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, p. 350–358, 2019.

SUN, W. *et al.* Material and energy flows of the iron and steel industry: Status quo, challenges and perspectives. **Applied Energy**, v. 268, 114946, 2020.

SWENNENHUIS, F.; DE GOOYERT, V.; DE CONINCK, H. Towards a CO₂-neutral steel industry: Justice aspects of CO₂ capture and storage, biomass- and green hydrogen-based emission reductions. **Energy Research and Social Science**, v. 88, 102598, 2022.

TAIRA, K. NO_x emission profile determined by in-situ gas monitoring of iron ore sintering during packed-bed coke combustion. **Fuel**, v. 236, n. June 2018, p. 244–250, 2019.

TAVARES, T. R. R. Examinando a injustiça ambiental a partir da contaminação do ar e de inundações nos arredores da Companhia Siderúrgica do Atlântico/Ternium, às margens da Baía de Sepetiba (Rio de Janeiro). **AMBIENTES**, v. 1, n. 2, p. 211-251, 2019.

United Nations Climate Conference. “Conference of the Parties” COP27. Sharm el-Sheikh, Egypt, 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY – USEPA. **National Ambient Air Quality Standard (NAAQS)**. USEPA, 1990.

VISURI, V. V. *et al.* A review of modeling hot metal desulfurization. **Steel Research International**, v. 91, 1900454, 2020.

WANG, J. *et al.* Impact analysis of meteorological variables on PM_{2.5} pollution in the most polluted cities in China. **Heliyon**, v. 9, n. 7, e17609, 2023.

WANG, R. *et al.* Emission characteristics and reactivity of volatile organic compounds from typical high-energy-consuming industries in North China. **Science of the Total Environment**, v. 809, p. 151134, 2022a.

WANG, S. *et al.* Trends in air pollutant emissions from the sintering process of the iron and steel industry in the Fenwei Plain and surrounding regions in China, 2014–2017. **Chemosphere**, v. 291, n. P2, p. 132917, 2022b.

WANG, R. Q. *et al.* Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122997, 2020.

WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021.

XI, H. *et al.* Artificial intelligent based energy scheduling of steel mill gas utilization system towards carbon neutrality. **Applied Energy**, v. 295, 117069, 2021.

XU, W. *et al.* Mercury emission from sintering process in the iron and steel industry of China. **Fuel Processing Technology**, v. 159, p. 340–344, 2017.

YANG, H. *et al.* The contribution of the Beijing, Tianjin and Hebei region's iron and steel industry to local air pollution in winter. **Environmental Pollution**, v. 245, p. 1095–1106, 2019.

YANG, Z. *et al.* Characterization of PM₁₀ surrounding a cement plant with integrated facilities for co-processing of hazardous wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, n. 2, p. 831–839, 2018.

YAO, Y. *et al.* Transmission paths and source areas of near-surface ozone pollution in the Yangtze River delta region, China from 2015 to 2021. **Journal of Environmental Management**, v. 330, 117105, 2023.

YU, J. *et al.* A review on reduction technology of air pollutant in current China's iron and steel industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 414, 137659, 2023.

ZAMBON MONTE, E. *et al.* Impactos das variáveis meteorológicas na qualidade do ar da Região da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 4, p. 546–554, 2016.

ZHAN, M. X. *et al.* Parameters affecting the formation mechanisms of dioxins in the steel manufacture process. **Chemosphere**, v. 222, p. 250–257, 2019.

ZHANG, H. *et al.* Physical and chemical characterization of fugitive particulate matter emissions of the iron and steel industry. **Atmospheric Pollution Research**, v. 13, 101272, 2022.

ZHAO, X. *et al.* Optimal scheduling of a byproduct gas system in a steel plant considering time-of-use electricity pricing. **Applied Energy**, v. 195, p. 100–113, 2017.

ZHOU, G. *et al.* Characteristics of PM₁ over Shanghai, relationships with precursors and meteorological variables and impacts on visibility. **Atmospheric Environment**, v. 184, p. 224–232, 2018.

ZHOU, K. *et al.* Declining dry deposition of NO₂ and SO₂ with diverse spatiotemporal patterns in China from 2013 to 2018. **Atmospheric Environment**, v. 262, n. 2, p. 118655, 2021.

ZHOU, X. *et al.* Formation and distribution of dioxins in agglomerated products and emitted dust during iron ore sintering. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 3, p. 109665, 2023.