



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
CURSO DE OCEANOGRAFIA

HERBERT RAFAEL BARBOSA DE SOUZA

**ANÁLISE DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE EFLUENTES EM CHAMINÉS DE
PROCESSO DE COMBUSTÃO INDUSTRIAL E GERAÇÃO TERMOELÉTRICA**

RECIFE

2024

HERBERT RAFAEL BARBOSA DE SOUZA

**ANÁLISE DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE EFLUENTES EM CHAMINÉS DE
PROCESSO DE COMBUSTÃO INDUSTRIAL E GERAÇÃO TERMOELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Oceanografia da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador (a): Profa. Dra. Dóris Regina Aires Veleda

Coorientador (a): Prof. Me. Paulo Estevão Lemos de Oliveira

Recife

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Souza, Herbert Rafael Barbosa de.

Análise da dispersão atmosférica de efluentes em chaminés de processo de combustão industrial e geração termoelétrica / Herbert Rafael Barbosa de Souza.
- Recife, 2024.

68 p. : il., tab.

Orientador(a): Dóris Regina Aires Veleda

Coorientador(a): Paulo Estevão Lemos de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Oceanografia - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. termoelétrica. 2. dispersão atmosférica. 3. AERMOD. I. Veleda, Dóris Regina Aires. (Orientação). II. Oliveira, Paulo Estevão Lemos de. (Coorientação). IV. Título.

550 CDD (22.ed.)

HERBERT RAFAEL BARBOSA DE SOUZA

**ANÁLISE DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE EFLUENTES EM CHAMINÉS DE
PROCESSO DE COMBUSTÃO INDUSTRIAL E GERAÇÃO TERMOELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Oceanografia da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovado em: 23/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Dóris Regina Aires Veleda (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Mônica Ferreira da Costa (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Thiago Luiz do Vale Silva (Examinador Externo)
Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC

Dedico o presente trabalho para todas as professoras e professores, do ensino básico até a graduação, que tive a imensa sorte de ter sido aluno. Da mesma forma e importância, dedico o presente trabalho a Erica Fonseca, que tenho alegria infinita de ser filho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de PD&I da Resolução ANP nº 50/2015.

A minha orientadora, professora Dóris Veleda, por todo o suporte nas diferentes etapas da pesquisa e pelos conhecimentos transmitidos dentro e fora da sala de aula. Muito obrigado, professora!

Ao meu coorientador, professor Paulo Oliveira, pela ajuda na elaboração da pesquisa assim como também pelas orientações nas aulas do PRH 38.1 além dos incentivos de atividades fora da academia. Obrigado, professor!

Aos meus amigos da Departamento de Oceanografia da UFPE por me proporcionar anos de estudos alegres e encorajadores. Fico muito feliz em saber que estou me formando com futuros profissionais corajosos, esforçados e gentis.

A todos os meus familiares que me deram suporte, encorajamento e ajuda nas diferentes etapas da minha vida pessoal, escolar e acadêmica. Aprendi e aprendo muito com vocês todos os dias.

Agradecimentos em especial para minha mãe, Erica Fernanda Barbosa da Fonseca, pois tal conquista é tanto dela quanto minha. Sou imensamente grato em todos os dias da minha existência por compartilhar a vida com você. Muito obrigado por tudo, de coração.

“Não saber de algo é geralmente um estágio intermediário no caminho para o conhecimento”
(Gaarder, J. em “O Mundo de Sofia”, p. 264)

RESUMO

O crescimento e desenvolvimento das nações são diretamente influenciados pela disponibilidade de energia. A produção energética é apontada como uma atividade antrópica que mais emitem gases de efeito estufa. No Brasil, as termoelétricas garantem a segurança energética do país em períodos adversos ao uso das hidroelétricas e demais fontes renováveis. Entretanto, a utilização das termoelétricas pode impactar a qualidade do ar decorrente das emissões de poluentes atmosféricos. O objetivo do estudo foi analisar a dispersão de uma pluma atmosférica emitida por uma termoelétrica a base de gás natural localizada em Ipojuca. Foi utilizado o *software* AERMOD para a modelagem das concentrações dos gases poluentes NO₂, CO e CO₂. As concentrações máximas modeladas para o NO₂ e CO foram comparadas com os padrões da regulação da qualidade do ar da Resolução CONAMA N° 491/2018. Treze pontos discretos foram inseridos na área de modelagem com elevada densidade populacional a fim de obter as concentrações máximas dos poluentes para esses locais. Foram investigados os diferentes usos do solo com potencial de captura e estoque de carbono sobre influência da dispersão da pluma de CO₂. Os resultados demonstraram que as concentrações máximas modeladas para o NO₂ média horária (15,17 µg/m³), NO₂ média anual (1,28 µg/m³) e CO média de 8 horas (1,94 x 10⁻³ ppm) estavam abaixo dos limites seguros determinados pelo CONAMA. A concentração máxima modelada nos pontos discretos dependeu da atuação de fatores combinados, como a distância e posição em relação as fontes, a elevação, o intervalo de tempo modelado e as condições climáticas atuantes no período de modelagem. Os principais usos de solo sobre influência da pluma de CO₂ da região são a agropecuária e a florestal. A transição energética em curso no planeta busca alinhar o desenvolvimento com a sustentabilidade nas diferentes formas de produzir e consumir energia. Com o AERMOD foi possível obter dados valiosos para a determinação da qualidade do ar assim como para a identificação e levantamento de áreas potenciais para mitigar o CO₂. Os resultados alcançados nesta pesquisa têm o potencial de serem fundamentais para orientar as decisões dos gestores do empreendimento no que diz respeito à implementação de práticas de mitigação para redução de emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa.

Palavras-chave: termoelétrica; dispersão atmosférica; AERMOD.

ABSTRACT

The growth and development of nations are directly influenced by the availability of energy. Energy production is identified as an anthropogenic activity that emits the most greenhouse gases. In Brazil, thermoelectric plants guarantee the country's energy security in periods adverse to the use of hydroelectric plants and other renewable sources. However, the use of thermoelectric plants can impact air quality due to emissions of atmospheric pollutants. The objective of the study was to analyze the dispersion of an atmospheric plume emitted by a natural gas-based thermoelectric plant located in Ipojuca. The AERMOD software was used to model the concentrations of polluting gases NO₂, CO and CO₂. The modeled maximum concentrations for NO₂ and CO were compared with the air quality regulation standards of CONAMA Resolution N° 491/2018. Thirteen discrete points were inserted in the modeling area with high population density in order to obtain the maximum concentrations of pollutants for these locations. Different land uses with potential for capturing and storing carbon under the influence of the dispersion of the CO₂ plume were investigated. The results demonstrated that the modeled maximum concentrations for hourly average NO₂ (15.17 µg/m³), annual average NO₂ (1.28 µg/m³) and 8-hour average CO (1.94 x 10⁻³ ppm) were below the safe limits determined by CONAMA. The maximum concentration modeled at discrete points depended on the action of combined factors, such as distance and position in relation to the sources, elevation, the modeled time interval and the climatic conditions operating during the modeling period. The main land uses influenced by the region's CO₂ plume are agriculture and forestry. The energy transition underway on the planet seeks to align development with sustainability in the different ways of producing and consuming energy. With AERMOD it was possible to obtain valuable data for determining air quality as well as for identifying and surveying potential areas to mitigate CO₂. The results achieved in this research have the potential to be fundamental in guiding the decisions of project managers regarding the implementation of mitigation practices to reduce emissions of atmospheric pollutants and greenhouse gases.

Keywords: thermoelectric; atmospheric dispersion; AERMOD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Ipojuca.	28
Figura 2 - Mapa da configuração do relevo do município de Ipojuca.	29
Figura 3 - Gráfico climatológico da intensidade do vento.	35
Figura 4 - Climatologia da direção do vento (1990 - 2020).	37
Figura 5 - Distribuição da frequência dos ventos (1990 - 2020).	38
Figura 6 - Dispersão do NO ₂ para a média horária.	39
Figura 7 - Dispersão do NO ₂ para a média anual.	42
Figura 8 - Dispersão do CO para a média de 8 horas.	44
Figura 9 - Concentrações máximas do NO ₂ da média horária nos pontos discretos.	46
Figura 10 - Concentrações máximas do NO ₂ da média anual nos pontos discretos.	47
Figura 11 - Concentrações máximas do CO da média de 8 horas nos pontos discretos.	48
Figura 12 - Dispersão anual da pluma de CO ₂	50
Figura 13 - Diferentes usos de solo sobre influência da pluma de CO ₂	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Padrões de qualidade do ar do Brasil.	24
Quadro 2 - Especificações técnicas do modelo AERMOD.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das fontes emissoras.....	32
Tabela 2 - Discretização dos pontos discretos.....	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivos específicos	18
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	19
2.1	TERMOELÉTRICAS BRASILEIRAS E CICLOS TERMODINÂMICOS	19
2.2	EMISSÕES DE EFLUENTES PROVENIENTES DE TERMOELÉTRICAS	20
2.3	POLUENTES ATMOSFÉRICOS E LEGISLAÇÃO BRASILEIRA.....	23
2.4	MITIGAÇÃO DO CO ₂ : CAPTURA, SEQUESTRO E MERCADO DE CARBONO	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	ÁREA DE ESTUDO	27
3.2	CLIMATOLOGIA	29
3.3	CONFIGURAÇÕES DO MODELO E DADOS DE ENTRADA.....	30
3.3.1	O AERMOD	30
3.3.2	FONTE DE EMISSÃO.....	32
3.3.3	CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS.....	32
3.3.4	DADOS DE ELEVAÇÃO E MALHA DE MODELAGEM	33
3.3.5	RECEPTORES DISCRETOS	33
3.4	IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PARA CAPTURA DE CO ₂	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	CLIMATOLOGIA DO VENTO.....	34
4.2	QUALIDADE DO AR	38
4.2.1	Dispersão de NO ₂	38
4.2.2	Dispersão de CO.....	43
4.3	MONITORAMENTO DOS PONTOS DISCRETOS	45
4.4	ÁREAS DE CAPTURA E ESTOQUE DE CARBONO	49
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS.....	58
	APÊNDICE A - CONVERSÃO DE UNIDADES PARA EMISSÃO DE CO ₂	67

1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico de uma nação está fortemente ligado à disponibilidade e ao consumo de energia (Goldemberg, 1998; Lloyd, 2017). Ao longo da história, os tipos de energia utilizados pela humanidade foram sendo alterados, impulsionados principalmente pelos avanços tecnológicos nas áreas de localização, extração, produção e distribuição de energia (Goldemberg e Lucon, 2007; Farias e Sellitto, 2011; Carvalho, 2014). No presente, as principais fontes que compõem a matriz energética primária mundial são: petróleo (29,47%), carvão (26,80%) e gás natural (23,68%); que em conjunto representam mais da metade da matriz global, seguidas por biocombustíveis (9,84%), nuclear (4,99%), hidráulica (2,67%), eólica e solar (2,54%) (IEA, 2023).

As fontes renováveis representam em torno de 30% da matriz energética mundial e cerca de 50% da matriz brasileira, caracterizando o Brasil como um dos países que mais utilizam energias renováveis no mundo (EPE, 2023; IRENA, 2023). Para o ano de 2022, a matriz energética primária do Brasil foi composta por derivados de petróleo (35,7%), biomassa da cana-de-açúcar (15,4%), hidráulica (12,5%), gás natural (10,5%), lenha e carvão vegetal (9,0%), lixívia e outras renováveis (7,0%), carvão mineral (4,6%), eólica (2,3%), urânio (1,3%) e solar (1,2%) (EPE, 2023). Em especial, as fontes energéticas utilizadas na geração de energia elétrica no Brasil produziram 677 TWh (terawatt-hora) de energia em 2022 e foram compostas principalmente por hidráulica (61,9%), eólica (11,8%), gás natural (6,1%), biomassa da cana-de-açúcar (4,7%), solar (4,4%), lixívia (2,5%) e nuclear (2,1%) (EPE, 2023).

A geração de energia é uma das atividades antrópicas que mais emitem gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, principalmente por meio da queima de combustíveis fósseis (IPEA, 2000; Goldemberg, 2012; IEMA, 2016; SEEG, 2023; IPCC, 2023). Elevadas emissões de GEE para a atmosfera, de origem natural e antrópica, geram desequilíbrios no balanço entre a radiação de onda curta, advinda do Sol, que entra no planeta e a energia emitida para o espaço, intensificando o efeito estufa e contribuindo para alterações climáticas em escala global (Goldemberg e Lucon, 2007; Molion, 2008; Yoro e Daramola, 2020). Entre os GEE destaca-se o dióxido de carbono (CO₂), configurando como o segundo mais abundante na atmosfera, ficando atrás apenas do vapor d'água, e cuja atual concentração global é de aproximadamente 420 ppm (parte por milhão), valor 1,5 vezes maior do que a

concentração de 280 ppm anterior à Revolução Industrial (Molion, 2008; Job *et al.*, 2023).

No setor de energia, o conceito de transição energética, ao ganhar destaque nos últimos anos, busca promover uma reestruturação da matriz energética global, orientando-a para fontes de energia com emissões de carbono e impactos ambientais reduzidos, alinhando, assim, a produção de energia com os princípios do desenvolvimento sustentável (EPE, 2018; EPE, 2020). O gás natural (GN) emerge como peça fundamental na transição energética, visto que sua queima resulta em emissões significativamente menores de GEE em comparação com outros combustíveis fósseis, como o óleo combustível, diesel e carvão (EPE, 2018; EPE, 2020, IPEA, 2021). No Brasil, a implementação do programa Novo Mercado de Gás, respaldada pela Nova Lei do Gás (Lei nº 14.134/2021), almeja promover um mercado mais aberto e competitivo a fim de atrair investimentos por meio de diferentes medidas, sendo uma delas a integração do GN com os setores elétrico e industrial, como no caso das termoeletricas (EPE, 2020; Brasil, 2024).

As unidades termoeletricas brasileiras são responsáveis por diversificar a matriz energética nacional, em junção com os demais tipos de fonte, garantindo a segurança elétrica do país, principalmente em cenários climáticos adversos ao uso de hidroelétricas e outras renováveis (Zancheta, Meldonian e Poli, 2005; Nakagawa, Comarú e Trigo, 2010; Lima e Souza, 2014; IEMA, 2016; EPE, 2016; CNI, 2018). No ano de 2022, as termoeletricas movidas a combustíveis fósseis integrantes do Sistema Interligado Nacional (SIN) forneceram 31,3 TWh de energia elétrica ao sistema, sendo 75% (23,3 TWh) correspondente ao uso do GN (IEMA, 2023). Dados do Balanço Energético Nacional realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (2023) apontam que 31% do GN produzido no Brasil em 2022 foram destinados para a geração de eletricidade, correspondente a um dos principais consumos desse combustível fóssil no país.

A relevância das termoeletricas é contraposta pelos impactos ambientais associados à sua operação, especialmente devido às emissões de GEE e poluentes atmosféricos (Zancheta, Meldonian e Poli, 2005; IEMA, 2021). O CO₂ é um importante GEE originado de termoeletricas, apresentando elevadas taxas de emissões (Goldemberg, 2012; IEMA, 2022a; IEMA, 2022b; IEMA, 2023). De acordo com o Instituto de Energia e Meio Ambiente (2023), as 72 usinas integrantes do SIN movidas a combustíveis fósseis emitiram ao todo 19,5 milhões de toneladas de dióxido de

carbono equivalente (CO_{2e}) em 2022. Um dos ambientes que atuam como sumidouros naturais de CO₂ atmosférico no planeta são os oceanos (Araújo *et al.*, 2019; Crisp *et al.*, 2022). Para a década de 2012 - 2021 o oceano armazenou cerca de $2,9 \pm 0,4$ GtC.ano⁻¹ (giga toneladas de carbono por ano), o que representa 26% do total de CO₂ emitido para esse intervalo de anos (Friedlingstein *et al.*, 2022). Entre os efeitos do aumento da concentração do dióxido de carbono na atmosfera, destaca-se a acidificação oceânica (Takahashi *et al.*, 2014). A acidificação oceânica decorre de um conjunto de reações químicas iniciada pela dissolução do CO₂ na água do mar resultando na maior liberação de íons de hidrogênio concomitante com diminuição do pH da água (Haugan e Drange, 1996). Um dos impactos da acidificação marinha é a dissolução das estruturas corpóreas dos organismos calcificantes, como alguns plânctons e recifes de coral (Kleypas *et al.*, 1999).

Os poluentes primários liberados durante a queima de combustíveis fósseis em termoelétricas incluem material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e monóxido de carbono (CO) (Epstein, 1990; Cardu e Baica, 1999; IEMA, 2016). Esses poluentes impactam a qualidade do ar da região ao redor da unidade emissora e podem, a depender de sua concentração e das condições meteorológicas locais, prejudicar a saúde humana, o meio ambiente e os materiais (Paz *et al.*, 2007; CETESB, 2019; Guzmán, Domínguez e Assis, 2022). No Brasil, a regulação da qualidade do ar é orientada pela Resolução de N° 491 de 2018 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Esta resolução estabelece padrões de qualidade do ar, definindo diretrizes que devem ser seguidas em todo o território nacional para garantir a preservação da saúde humana, bem-estar público, integridade de materiais, e a proteção da fauna e flora (Brasil, 2018).

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho possui como objetivo analisar a dispersão de uma pluma de efluentes atmosféricos, emitida por uma termoelétrica a base de gás natural localizada no município de Ipojuca (PE), através da modelagem computacional.

1.1.1 Objetivos específicos

- I. Levantar e analisar o comportamento do vento através dos dados climatológicos da intensidade e direção do vento da área de estudo para o período de 1990 – 2020;
- II. Comparar as concentrações máximas modeladas para os gases NO₂ e CO com os padrões determinados pela Resolução 491/18 do Conselho Nacional do Meio Ambiente;
- III. Analisar as máximas concentrações dos gases NO₂ e CO em pontos discretos com elevada densidade populacional, e
- IV. Modelar a dispersão anual do CO₂ e determinar as áreas de influência da pluma com potencial de captura e estoque de carbono.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 TERMOELÉTRICAS BRASILEIRAS E CICLOS TERMODINÂMICOS

As unidades termoelétricas realizam a conversão da energia química presente nos combustíveis fósseis em energia térmica, que, por sua vez, é transformada em energia mecânica e, finalmente, convertida em energia elétrica (Goldemberg, 2012; Lima e Souza, 2014; EPE, 2016; IEMA, 2016). A energia elétrica produzida é transferida para centrais de distribuição via cabos de alta tensão e então disponibilizada para os consumidores residências, empresariais e indústrias.

Diferentes ciclos termodinâmicos são empregados nas unidades termoelétricas para produção de energia elétrica, existindo três ciclos principais, sendo eles: ciclo Rankine, ciclo Brayton e ciclo misto (IEMA, 2016). No ciclo Rankine a rotação das turbinas ocorre através do vapor gerado em uma caldeira. Essa rotação é subsequentemente transferida para o gerador elétrico por meio de um eixo. As emissões atmosféricas associadas a esse processo derivam do uso de combustível, utilizado para transformar água em vapor na caldeira. No ciclo Brayton o gás natural ao ser injetado na câmara de combustão junto com o ar vindo do compressor é queimado. Os gases dessa combustão são transferidos para a turbina, girando as pás. As emissões atmosféricas nesse ciclo ocorrem após a passagem dos gases de combustão passarem pela turbina. Por sua vez, o ciclo misto combina os ciclos Rankine e Brayton de forma que uma caldeira de recuperação de calor, que une os

ciclos, é utilizada para aproveitar a energia contida nos gases de exaustão da turbina a gás. Essa energia é então utilizada na geração de vapor no ciclo de Rankine.

Nos primeiros anos da década de 2000, o governo brasileiro iniciou uma expansão do número de termoeletricas por meio do Programa Prioritário de Termoeletricas, respaldado pelo Decreto N° 3.371 de 24 de fevereiro de 2000 (Brasil, 2000; CNI, 2018). O Programa foi uma resposta direta do governo nacional para prevenir possíveis episódios de escassez de energia, semelhantes aos ocorridos entre os anos 2000 e 2001, quando a falta de chuvas resultou em níveis baixos de armazenamento nos reservatórios das hidroelétricas (Martits, Garcia e Júnior, 2012; IEMA, 2023). Diferentemente do que ocorreu em 2001, quando o número de termoeletricas eram baixos, o Brasil utilizou da termoeletricidade como suprimento de energia em momentos críticos de hidrologia, como os observados entre os anos de 2013 e 2016 (CNI, 2018).

No contexto atual, o Brasil possui 72 termoeletricas a base de combustíveis fósseis interconectadas ao SIN, apresentando uma variedade de configurações de ciclos termodinâmicos e diferentes tipos de combustíveis utilizados (IEMA, 2023). Em 2022, dos 31,1 TWh produzido por essas unidades 23,3 TWh (75%) foram produzidos a base de gás natural, 6,9 TWh (22%) a carvão mineral, 0,5 TWh (2%) a óleo diesel e 0,3 TWh (1%) a óleo combustível. As termoeletricas movida a GN em 2022 representaram o montante de 41 unidades dispersas pelo país, sendo a maior quantidade presente no subsistema Sudeste/Centro-Oeste (21), seguida dos subsistemas Norte (11), Nordeste (6) e Sul (3). Até o final de 2030 é esperado que mais usinas termoeletricas movidas a GN sejam construídas no Brasil, conforme a Lei de N° 14.182/2021 de 12 de julho de 2021 (Brasil, 2021). Essa lei prevê a instalação de 8 mil MW no Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do país.

2.2 EMISSÕES DE EFLUENTES PROVENIENTES DE TERMOELÉTRICAS

Os combustíveis empregados na geração de termoeletricidade podem ser classificados em três categorias: fósseis, que incluem carvão mineral, gás natural, óleo diesel e óleo combustível; renováveis, como biogás e a biomassa; e nuclear, como no caso das centrais nucleares (Goldemberg, 2012; IEMA, 2016; Gabriel, 2021). A depender do combustível utilizado e das tecnologias de controle de emissão da unidade, diferentes parcelas de poluentes serão emitidas para a atmosfera. Os

principais poluentes primários emitidos por termoelétricas são: o material particulado, os óxidos de nitrogênio, os óxidos de enxofre, o monóxido de carbono e o dióxido de carbono.

As unidades movidas a carvão mineral são as mais poluidoras em material particulado, que é um composto extremamente danoso para a saúde humana e meio ambiente (Villela e Silveira, 2007; Brasil, 2016). O material particulado é caracterizado por possuir um diâmetro reduzido, podendo ser de origem sólida ou líquida, e tem a capacidade de permanecer em suspensão no ambiente após ser emitido pelas atividades poluidoras (IEMA, 2016). O grupo de partículas que são classificados os materiais particulados englobam pós, poeira, fumaças, aerossóis e até mesmo o pólen (Torres e Martins, 2005; Villela e Silveira, 2007). Sua origem nas termoelétricas decorre da combustão incompleta do combustível fóssil e suas dimensões variam entre 0,1 – 10 μm . Devido ao seu tamanho diminuto, as partículas podem ser inaladas, afetando o sistema respiratório desde os alvéolos até a região de troca gasosa nos pulmões (Brasil, 2016). O material particulado, dependendo de sua composição química e concentração, representa uma ameaça significativa ao meio ambiente. Este pode causar lesões nas folhas das plantas, perturbar a ciclagem dos nutrientes no solo e ainda diminuir a capacidade de interceptação solar nas copas das árvores (Grantz, Garner e Johnson, 2003).

Os óxidos de nitrogênio são originados no processo de queima do combustível fóssil na presença de ar atmosférico sob efeito de altas temperaturas, na qual moléculas de oxigênio e nitrogênio reagem formando óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) (Villela e Silveira, 2007; IEMA, 2016). Nesse processo, forma-se mais NO do que NO₂, entretanto há a conversão total de NO em NO₂ na atmosfera. Elevadas concentrações do dióxido de nitrogênio causam efeitos na saúde humana através de problemas respiratórios e pulmonares (Jarvis *et al.*, 2010), enquanto que no meio ambiente contribuem para a formação de chuva ácida que afeta principalmente a química dos corpos hídricos e estruturas materiais (Mohnen, 1998; Goldemberg, 2012). O NO₂ também é responsável pela síntese de ozônio troposférico, que é um poluente secundário danoso à saúde humana cuja exposição a longo prazo acarreta em problemas pulmonares, desenvolvimento de asma e redução da expectativa de vida.

Os óxidos de enxofre representam uma classe de poluentes atmosféricos que têm origem na queima de combustíveis fósseis contendo enxofre. As instalações

termoelétricas que utilizam óleo e carvão são uma das principais fontes de emissão desses compostos (Villela e Silveira, 2007; IEMA, 2016). A maior parcela emitida nas unidades termoelétricas é na forma de dióxido de enxofre (SO_2) seguida pelo trióxido de enxofre (SO_3). Ambas as formas, ao serem hidrolisadas, originam ácidos com potencial significativo para causar impactos ambientais através da chuva ácida (Goldemberg, 2007). Na saúde humana o SO_2 tem efeitos negativos nos pulmões e coração, podendo agravar problemas pulmonares e cardiovasculares preexistente levando a óbito os indivíduos (CETESB, 2021).

Monóxido de carbono (CO) é formado durante a combustão incompleta de combustível carbonosos em ambiente fechado, como por exemplo a madeira e os derivados de petróleo (Villela e Silveira, 2007; Penney *et al.*, 2010; IEMA, 2016). É um gás tóxico que afeta a oxigenação dos tecidos do corpo. O CO em baixas concentrações pode causar fadiga e dor no peito e em altas concentrações pode levar a morte por asfixia, devido à alta afinidade dessa molécula com a hemoglobina do sangue o que causa comprometimento no transporte de oxigênio pelo o corpo (CETESB, 2022).

Por sua vez, o dióxido de carbono é emitido em grande quantidade nas termoelétrica durante o processo de queima dos combustíveis fósseis (Goldemberg, 2012; IEMA, 2016). A emissão do CO_2 em termoelétrica depende do combustível utilizado em conjunto com a eficiência de conversão de energia da unidade. O dióxido de carbono é um significativo GEE e seu contínuo aumento tem impactos na saúde humana e no meio ambiente, contribuindo para mudanças climáticas em diversas regiões do globo, como por exemplo na intensificação de eventos extremos (Amirkhani *et al.*, 2022), acidificação oceânica (Doney *et al.*, 2009), perda de biodiversidade (Retallack, 2007), aumento do nível médio do mar (Oppenheimer *et al.*, 2019). Em termos de saúde humana, altas concentrações de CO_2 em ambientes fechados podem causar desconforto e alterações na frequência respiratória (30.000 – 50.000 ppm), perda de consciência (acima de 50.000 ppm) e, em casos de exposição prolongada a concentrações acima de 100.000 ppm, coma e morte (Hepple, 2005).

A Política Nacional do Meio Ambiente (PLMA), criada em 1981 (Lei N° 6.938/1981) e atualizada em 2000 (Lei N° 10.165/2000), é uma instrumentação que objetiva a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, buscando assegurar no território nacional condições para o desenvolvimento socioeconômico e a proteção da dignidade da vida humana (Brasil, 1981; Brasil,

2000). Dessa forma, a PLMA estabelece as diretrizes e objetivos para a gestão ambiental no país sendo norteadas por dez princípios, sendo um deles o controle e zoneamento das atividades potencial ou efetivamente poluidoras. Entre as atividades poluidoras, a categoria de serviços e utilidades abrange a produção de energia termoelétrica. A instrumentação determina que todas os indivíduos que exerçam as atividades inseridas na Lei 10.165/2000 são obrigadas a pagar a Taxa de Controle e Fiscalização Ambiental – TCFA além de apresentar anualmente relatórios acerca das atividades realizadas.

2.3 POLUENTES ATMOSFÉRICOS E LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

No final da década de 80 foi criado no Brasil o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR), através da Resolução N° 05 de junho de 1989, como forma de alinhar o crescimento econômico do país com a preservação da qualidade ambiental (Brasil, 1989). O PRONAR estabeleceu os limites nacionais de emissões para diferentes tipos de fontes e poluentes prioritários, e além disso determinou medidas de curto, médio e longo prazo com o objetivo de aprimorar a gestão da qualidade do ar no país. Algumas das ações notáveis incluem a implementação da Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar, que permite o acompanhamento em tempo real dos níveis de poluentes em diversas regiões do país, e a criação do Inventário Nacional de Fontes e Emissões, que compila dados detalhados sobre as fontes de poluição e as emissões associadas. Essas medidas visam fornecer informações sólidas para embasar políticas eficazes de controle da poluição do ar e promover a preservação da qualidade ambiental a longo prazo.

No Brasil a regulamentação das emissões atmosféricas e qualidade do ar é de responsabilidade do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que determina, através de suas resoluções, níveis de emissões seguros para a saúde humana, materiais e meio ambiente. Um dos primeiros dispositivos legais do PRONAR foi a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) N° 03 de junho de 1990, que estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar (Brasil, 1990). Em 2018 a Resolução CONAMA 03/90 foi então atualizada e revogada pela Resolução 491/2018.

A Resolução CONAMA N° 491/2018 dispõe e estabelece padrões de qualidade do ar para todo o território nacional, com base nos valores guia

recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (Brasil, 2018). São elencados nessa Resolução os padrões de qualidade do ar para os seguintes poluentes atmosféricos: material particulado (MP₁₀: partícula com tamanho aerodinâmico igual ou inferior a 10 µm e MP_{2,5}: partícula com tamanho aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 µm), dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, ozônio, fumaça, monóxido de carbono, partículas totais em suspensão e chumbo (Quadro 1).

Quadro 1 - Padrões de qualidade do ar do Brasil.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	ppm
Material Particulado - MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP _{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	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
5 - medido nas partículas totais em suspensão

Fonte: Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2018.

Segundo a Resolução 491/18 é definido como padrão de qualidade do ar o instrumento de gestão da qualidade do ar, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica. Os padrões nacionais de qualidade do ar são divididos em dois grupos, sendo eles: padrões intermediários (PI) e padrão final (PF). Os padrões intermediários são valores

temporários a serem cumpridos em quatro etapas para que sejam atingidos no futuro o padrão final, sendo esses os valores guias da OMS definidos em 2005.

2.4 MITIGAÇÃO DO CO₂: CAPTURA, SEQUESTRO E MERCADO DE CARBONO

Os gases do efeito estufa são definidos como compostos gasosos que possuem a capacidade de reter calor na atmosfera terrestre, sendo originados de forma natural ou antrópica (Goldemberg e Lucon, 2007; Molion, 2008; Yoro e Daramola, 2020). Possuem o importante papel de regular o clima no planeta, garantindo níveis de temperatura favoráveis as formas de vida na Terra. Compõem o grupo do GEE os seguintes gases: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorcarbonos (CFCs), gases fluorados, ozônio (O₃) e vapor d'água (H₂O). O aumento nas concentrações dos GEE, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis e desflorestamento, é correlacionado com alterações climáticas a nível mundial com prejuízos nas áreas sociais, econômicas e ambientais de diversos países.

Desde 1972 com a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo, encontros entre líderes mundiais, cientistas e ambientalistas ocorreram de forma frequente com o objetivo de discutir questões envolvendo a preservação do meio ambiente e práticas sustentáveis. O grande marco de 1972 foi a elaboração da Declaração de Estocolmo sobre o Meio Ambiente, no qual foram definidos princípios comuns norteadores para preservar e melhorar o meio ambiente no qual a humanidade está inserida (UNEP,1972). Diversos outros encontros foram realizados, e, em especial, no ano de 2015 durante a 21ª Conferência das Partes Signatárias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) foi criado o Acordo de Paris (UN, 2015; Vital, 2018). O documento em questão consta com a definição de metas individuais de 189 países no que tange a suas respectivas reduções de CO₂. O Brasil comprometeu-se com a redução de suas emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005 no ano de 2025, e, posteriormente, com a redução de 43% para o ano de 2030.

A captura e sequestro de carbono são componentes utilizados na mitigação das emissões de CO₂, representando um conjunto de diversas técnicas empregadas para neutralizar o dióxido de carbono liberado por atividades humanas (Vital, 2018;

EPE, 2021). A captura de carbono pode ser realizada por meio de remoção tecnológica, como a bioenergia com captura e armazenamento de carbono, captura e armazenamento direto de carbono na atmosfera e intemperismo acelerado. Além disso, ela pode ocorrer por meio de processos naturais realizados por organismos fotossintéticos, como a recuperação da vegetação nativa, aprimoramento do manejo florestal e fixação do carbono no solo na agricultura. O sequestro de carbono envolve o armazenamento do CO₂ em locais isolados da atmosfera e constitui uma atividade integrada que ocorre após a fase de captura.

Diante dos acordos internacionais acerca da diminuição das emissões de carbono dos países signatários, surgiu a precificação das emissões de carbono e o consequente mercado de carbono após o Protocolo de Quioto publicado em 1997 (UNFCCC, 1997; Vital, 2018; EPE, 2021). O mercado de carbono iniciou-se no continente europeu pelo sistema de *Emission Trading Schemes* – ETS (Esquemas de Comércio de Emissões), no qual o governo de cada país determina quantidades máximas de emissão para cada atividade emissora. As empresas que emitem uma quantidade menor do limite são permitidas por lei a ganhar créditos, sendo esses créditos passivos de serem comprados pelas empresas que extrapolaram seus limites. Existem outros diferentes instrumentos para a precificação do carbono, como por exemplo *Certified Reduction Emission* – CRE (Reduções Certificadas de Emissões), impostos sobre emissão de carbono e financiamento direto a projetos limpos. A expansão do mercado de carbono para níveis internacionais mostra-se relevante para acelerar a redução das emissões de carbono no mundo e, ao mesmo passo, poderá beneficiar os países pobres com injeção direta de receitas pela venda de seus créditos de carbono.

No Brasil, o Decreto Federal 11.075/2022 que norteia a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas e institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa pode ser considerado como os passos iniciais para a precificação do carbono no país (Brasil, 2022; EPE, 2022). A medida em questão define os conceitos de crédito de carbono e metano, unidades de estoque de carbono, sistema de registro nacional de emissões e reduções, assim como transações de créditos. Além disso, inaugura um mercado de carbono com ênfase na exportação de créditos, especialmente para países e empresas que necessitam compensar emissões para cumprir seus compromissos de neutralidade de carbono. Entretanto, ainda são esperados definições e avanços mais efetivos na

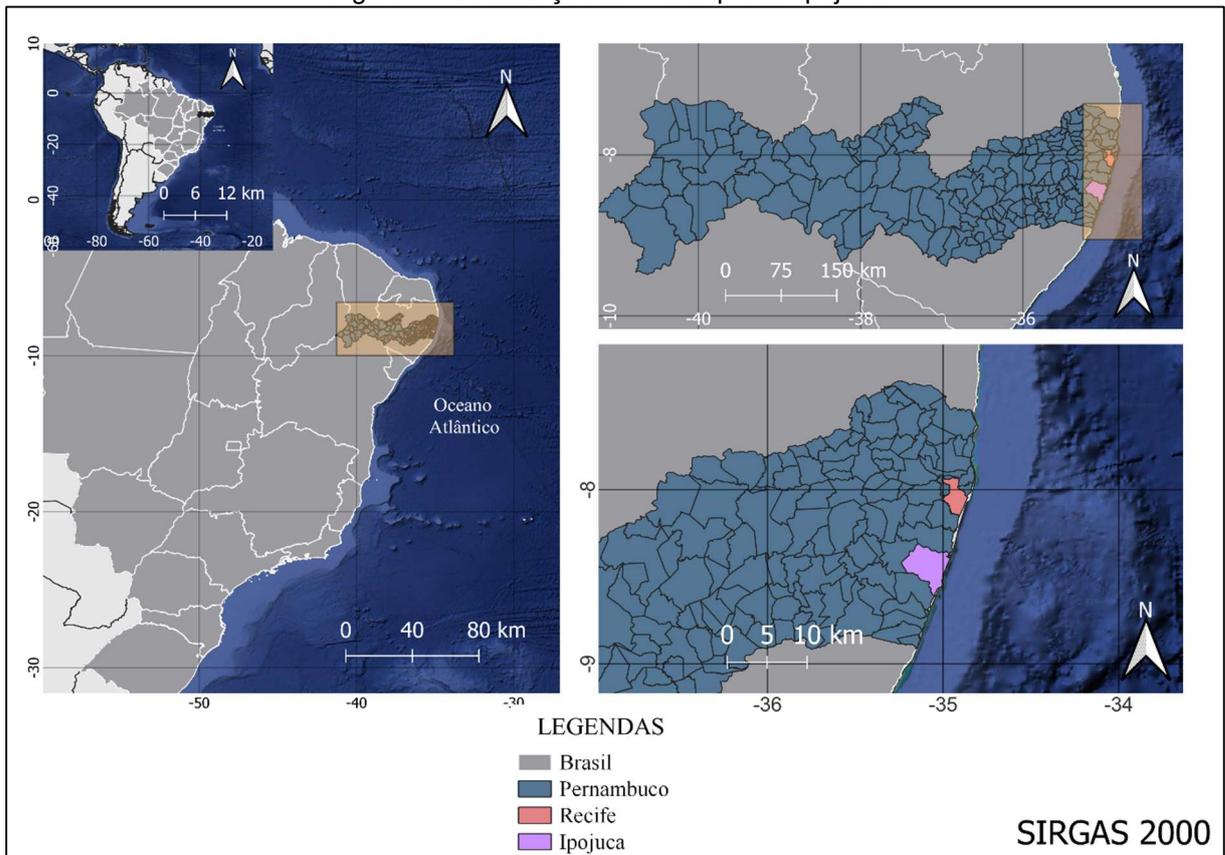
regulamentação e implementação dos mercados de carbono brasileiro e internacional. Recentemente, no final de 2023, foi aprovado na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei 2148/15 que regulamenta o mercado de carbono no Brasil através do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) (Agência Câmara de Notícias, 2023). O SBCE é inspirado em projetos bem-sucedidos de outros países e prever a criação de limites de emissões para atividades poluidoras, venda e compra de créditos de carbono. O Projeto de Lei elenca as seguintes ações geradoras de créditos de carbono: recomposição, manutenção, e conservação de áreas de preservação permanentes, pertencentes a reserva legal, de uso restrito ou unidades de conservação; as unidades de conservação integral ou de uso sustentável, e os projetos de assentamentos da reforma agrária. O PL 2148/15 encontra-se no Senado onde aguarda a aprovação de seu texto.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A unidade emissora dos efluentes atmosféricos é uma termelétrica a base de gás natural localizada no município de Ipojuca, litoral Sul do Estado de Pernambuco (Fig. 1). O município em questão localiza-se nas coordenadas 8° 23' 56" S de latitude e 35° 03' 50" O de longitude, distante 50 km do município de Recife, capital pernambucana.

Figura 1 - Localização do município de Ipojuca.



Fonte: O autor (2024).

Ipojuca possui limites municipais ao norte com Cabo de Santo Agostinho, ao sul com Sirinhaém, a oeste com Escada e limite físico a leste com o Oceano Atlântico. Possui uma área territorial de 521,8 km², da qual 29,39 km² (5,6 %) é urbanizada. Sua densidade demográfica é de 189,60 hab/km², com PIB per capita de R\$ 139.391,96 e IDHM 0,619 (IBGE, 2023).

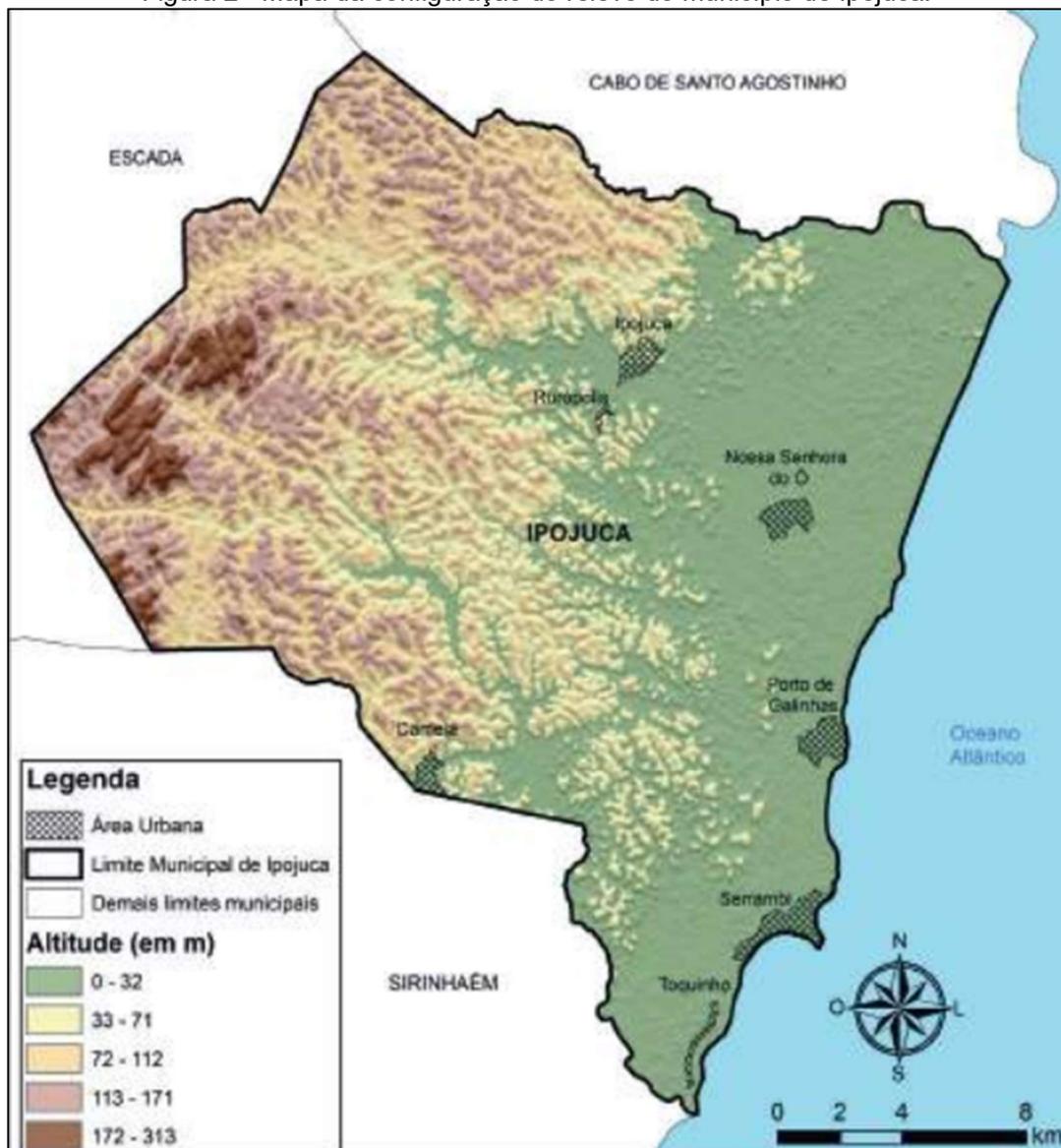
As principais atividades econômicas do município são a agropecuária, indústria e serviços. Dados do CONDEPE – FIDEM (2020) apontam que em 2020 Ipojuca respondeu por 7,04% do PIB de Pernambucano (R\$ 13,614 bilhões), sendo a segunda maior contribuição municipal para o Estado, atrás somente da capital Recife.

De acordo com a classificação climática de Strahler o clima do município é definido como Tropical Litorâneo Úmido, existindo apenas um ou dois meses de estiagem (Bueno e Pinheiro, 2016). Em relação a vegetações nativas, o município apresenta fragmentos do bioma Mata Atlântica em seu território e florestas de mangue ao longo do seu litoral.

As principais formas de relevo presentes em Ipojuca são os planaltos e as planícies (Fig. 2). Os planaltos são as formas mais elevadas (33 – 313 m) distribuídas

principalmente na porção oeste do município. As planícies, relevo de menor altitude, estão presentes na parte leste, no litorânea ipojucano, apresentando cotas mínimas que chegam ao nível do mar abrangendo as planícies costeiras, fluviomarinhas e fluviolacustres (Bueno e Pinheiro, 2016).

Figura 2 - Mapa da configuração do relevo do município de Ipojuca.



Fonte: BUENO e PINHEIRO, 2016, p. 43

3.2 CLIMATOLOGIA

A climatologia do vento, intensidade e direção, foi determinada através da análise de dados de 1990 a 2020 adquiridos da base ERA5-Land, disponibilizado pelo programa Copernicus (<https://climate.copernicus.eu/>). Os dados foram extraídos na

posição de 8.41° S e 34.97° W, correspondente a localização mais próxima da unidade emissora. Os dados da intensidade do vento foram obtidos como média mensal, a partir da média de todos os dados diários, do período em questão. Tratamento e análise dos dados foram realizados no *software* Excel.

Para a análise da direção do vento foram obtidos dados de reanálise da média mensal, por hora do dia, da mesma base de dados do ERA5-Land. Para o tratamento dos dados foi utilizado o programa WRPLOT View da *Lakes Environmental Software*. O WRPLOT consiste em um programa livre onde os *inputs* são os dados horário do vento (intensidade e direção), data e hora e os *outputs* são uma rosa dos ventos e uma distribuição de frequência da sua intensidade para o determinado intervalo escolhido.

3.3 CONFIGURAÇÕES DO MODELO E DADOS DE ENTRADA

3.3.1 O AERMOD

A modelagem computacional da dispersão atmosférica foi realizada por meio do programa AMS/EPA *Regulatory Model* (AERMOD) disponibilizado pela *Lakes Environmental Software* (<https://www.weblakes.com/>). O AERMOD consiste em um modelo de pluma Gaussiana, em estado estacionário, de curto alcance (até 50 km) baseado na estrutura de turbulência na camada limite planetária, possuindo tratamento para fontes superficiais e elevadas e pode ser utilizado para terrenos simples ou complexos (Perry *et al.*, 2005; SCRAM, 2023).

O programa foi desenvolvido a partir dos anos 90 pela Sociedade Meteorológica Americana (*American Meteorological Society*, AMS) em conjunto com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency*, US EPA) como fruto da incorporação dos avanços científicos das décadas anteriores no que tange a modelagem da dispersão atmosférica para aplicações regulatórias (Cimorelli *et al.*, 2005). No presente, o AERMOD possui o *status* de modelo recomendado para fins regulatórios da qualidade do ar, sendo utilizado em diversos países (SCRAM, 2023).

Algumas das especificações técnicas do AERMOD estão inseridas no Quadro 2.

Quadro 2 - Especificações técnicas do modelo AERMOD.

Parâmetro	Descrição
Nome do modelo	AERMOD.
Desenvolvimento	AERMIC - (Sociedade Meteorológica Americana (AMS) e Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA dos EUA).
Tipo de modelo	Modelo de dispersão de ar da pluma gaussiana em estado estacionário.
Faixa	Até 50 km da fonte.
Modelo de estabilidade atmosférica	Teoria da camada limite planetária, conceitos de escala de turbulência.
Campo de vento	Homogêneo.
Tipos de lançamento	Plumas flutuantes ou neutras
Tipos de emissões	Constante ou variável no tempo, planejada ou fugitiva.
Química atmosférica	NO _x para NO ₂ e SO ₂ decaem.
Tipos de fonte	Ponto, área, volume, cava aberta, linha, <i>flare</i> .
Meteorologia	Dados horários de superfície e ar superior (processados pela AERMET) Requisitos mínimos para arquivo de dados meteorológicos de superfície AERMOD.
Terreno	Plano ou elevado (terreno processado pela AERMAP).
Receptores	Vários tipos de grades (cartesianas, polares) e receptores discretos.
Outras opções	<i>Downwash</i> de construção (modelado por BPIP-PRIME).
Status regulatório	Modelo regulatório preferido da EPA dos EUA para aplicações de campo próximo.

Fonte: *Lakes Environmental Software (2024)*.

O AERMOD opera como programa principal possuindo dois pré-processadores para dados meteorológicos, o ARMET, e dados de terreno, o AERMAP. O AERMET tem como principais funções o cálculo dos parâmetros da camada limite, a geração de perfis das variáveis meteorológicas e a transferência dos dados obtidos para o AERMOD. Por sua vez, o AERMAP utiliza dados de terreno em grade para calcular a influência da topografia local, possibilitando que a elevação para cada receptor seja especificada e enviada para o AERMOD (EPA, 2004).

3.3.2 FONTE DE EMISSÃO

Os dados físicos, de exaustão e a taxa de emissão das chaminés da termoelétrica foram retiradas do trabalho de Nunes (2017). No trabalho, a autora utilizou o AERMOD para avaliar o impacto das emissões de efluentes atmosféricos de cinco empresas localizadas em Ipojuca, sendo uma delas a unidade de interesse do presente estudo. Na Tabela 1 estão inseridas as informações das duas chaminés com as suas respectivas taxas de emissão para os NO_x e CO.

Tabela 1 - Dados das fontes emissoras.

IDENTIFICAÇÃO DA CHAMINÉ	PARÂMETROS DA CHAMINÉ				TAXA DE EMISSÃO (g/s)	
	FÍSICO		EXAUSTÃO		NO _x	CO
	Altura (m)	Diâmetro (m)	Velocidade de descarga (m/s)	Tempratura (K)		
Chaminé A	43,20	5,60	36,80	360,65	5,88	2,29
Chaminé B	43,20	5,60	36,80	360,65	7,75	0,99

Fonte: Nunes (2017).

O valor de entrada para a taxa de emissão do CO₂ foi retirado do 3º Inventário de Emissões Atmosféricas em Usina Termelétricas (IEMA, 2023). O documento, que aborda as emissões do dióxido de carbono das unidades termoelétricas inseridas no SIN (Sistema Integrado Nacional), aponta que para o ano base de 2022 o empreendimento de interesse emitiu 7 mil toneladas de CO₂e (dióxido de carbono equivalente). Uma conversão de unidades fora necessária para que a unidade de emissão estivesse de acordo com os valores de entrada para o AERMOD (Apêndice A).

3.3.3 CONDIÇÕES METEREOLÓGICAS

Dados meteorológicos foram adquiridos junto com a licença do AERMOD para o período de 01 de janeiro de 2019 às 00 horas até 31 de dezembro de 2021 às 23 horas. A aquisição dos dados cobriu uma área com dimensões de 12 km x 12 km centrada na coordenada geográfica 8.381389° S e 35.02222° W. Os dados meteorológicos representativos da área de estudo processados no AERMET foram

gerados pelos modelos WRF (*Weather Research and Forecasting*) e MMIF (*Mesoscale Model Interface Program*). O WRF consiste em um modelo de previsão meteorológica numérica de mesoescala baseado em condições reais ou idealizadas, podendo ser utilizado em aplicações de estudo em escalas de dezenas de metros a milhares de quilômetros. Por sua vez, o MMIF é um modelo da EPA que realiza o pré-processamento necessários para a modelagem regulatória utilizada pelo AERMET e, posteriormente, no AERMOD. As saídas do MMIF contêm as características da superfície da região de interesse, o que inclui albedo, razão de Bowen e rugosidade da superfície, necessárias para a modelagem da dispersão.

3.3.4 DADOS DE ELEVAÇÃO E MALHA DE MODELAGEM

Dados de terreno utilizados na modelagem foram retirados da base de dados altimétricos global SRTM3 - *Shuttle Radar Topography Mission Global Coverage* com resolução de aproximadamente 30 metros, utilizando o processador AERMAT. Foram utilizados dois arquivos para o levantamento de terreno da região, sendo eles: s09_w035_1arc_v3.bil e s09_w036_1arc_v3.bil cujo sistema de referência é o Datum WGS84.

Uma malha cartesiana uniforme foi gerada no ambiente AERMOD com dimensões de 40 km x 40 km contendo 40.000 pontos receptores espaçados em 200 m entre si abrangendo a região modelada. A malha foi centrada nas coordenadas UTM 273398,50 m E e 9076391,65m S da zona 25 L.

3.3.5 RECEPTORES DISCRETOS

Foram adicionados treze pontos discretos à malha de modelagem, correspondentes às áreas de elevada densidade populacional presentes no domínio modelado, a fim de obter informações sobre as concentrações dos poluentes atmosféricos, NO_x e CO, nessas localidades. A Tabela 2 fornece as identificações, as coordenadas geográficas em UTM, as distâncias e as posições relativas entre os pontos descritores e a fonte emissora.

Tabela 2 - Discretização dos pontos discretos.

Ponto	Local	Coordenadas (UTM)		Distância das fontes (km)	Posição em relação as fontes (°)	Elevação (m)
		x	y			
1	Muro Alto	282173.00	9067636.00	3.00	24.88	11.94
2	Suape	284715.00	9076069.00	5.85	192.91	17.95
3	Nossa Senhora do Ó	277863.00	9066149.00	7.01	232.72	8.00
4	Gaibu	284952.00	9078541.00	8.32	190.76	17.95
5	Ipojuca Centro	274557.00	9071805.00	8.99	99.62	10.15
6	Porto de Galinhas	279521.00	9059063.00	11.95	19.26	0.05
7	Paiva	285739.00	9085142.00	14.97	189.11	22.60
8	Cabo Centro	275046.00	9083010.00	15.19	147.01	15.52
9	Ponte dos Carvalhos	281413.00	9088737.00	18.52	354.11	4.37
10	Camela	266368.00	9058175.00	20.95	234.60	116.40
11	Jaboatão dos Guararapes	287908.00	9095049.00	25.10	10.51	13.97
12	Escada	253598.00	9075507.00	30.27	100.19	30.16
13	Juçaral	254685.00	9091278.00	35.54	126.68	303.80

Fonte: O autor (2024).

3.4 IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PARA CAPTURA DE CO₂

A identificação das áreas com potencial de captura de CO₂ foi realizada por meio da integração dos softwares AERMOD e QGIS. Os arquivos de saída do AERMOD, que inclui isolinhas de concentração de CO₂ georreferenciadas, foram importados para o QGIS. Dentro do ambiente QGIS foram utilizados os dados do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomias) que disponibiliza dados de uso e cobertura de terra de 1985 a 2022 (<https://brasil.mapbiomas.org/produtos/>). Foram utilizados nesse estudo os dados do ano de 2022, correspondente ao conjunto de dados mais recentes. Dessa forma, foi possível a identificação e delimitação das áreas de vegetação, biomas e cultivos, sob influência da dispersão atmosférica da pluma de CO₂.

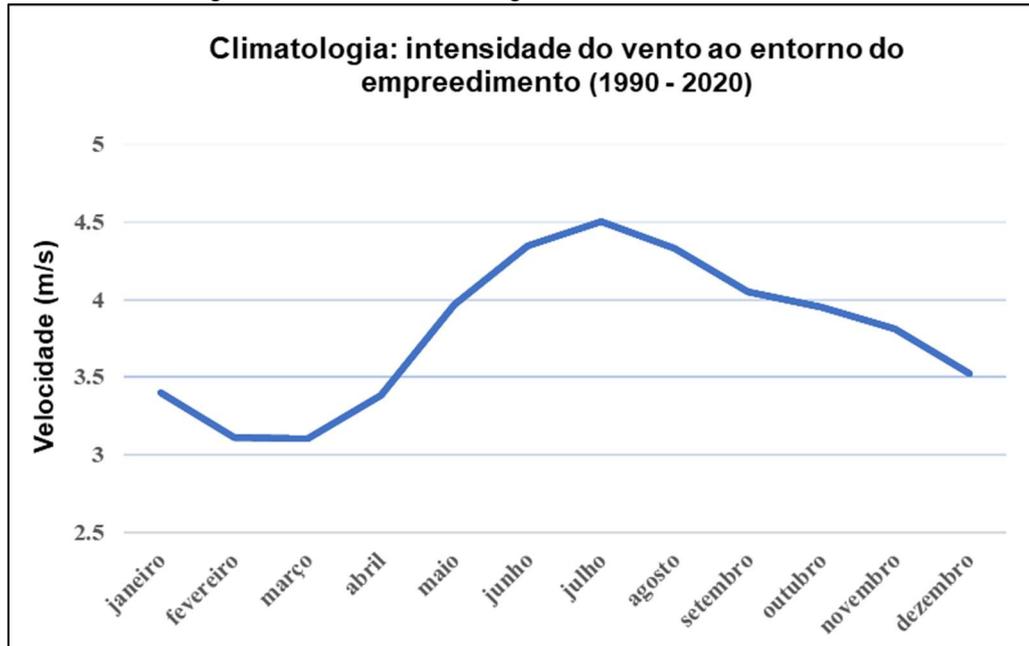
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CLIMATOLOGIA DO VENTO

Os padrões dinâmicos do vento são controlados por influências climáticas que variam em escala e tempo, além de serem influenciados pelas as condições geográficas locais, rugosidade da superfície, relevo, estação do ano e vegetação (Silva *et al.*, 2013; Oliveira Júnior *et al.*, 2013; Castelhana e Roseghini, 2018). O

gráfico da climatologia do vento, construído a partir dos dados do ERA5-Land, apresenta uma sazonalidade da intensidade do vento incidente na região do estudo (Fig. 3). O período de fevereiro a março representa os meses de menor intensidade do vento, com velocidades próximas a 3 m/s, enquanto que os meses de junho a agosto representam o período de maior intensidade, com valores próximos a 4,5 m/s.

Figura 3 - Gráfico climatológico da intensidade do vento.



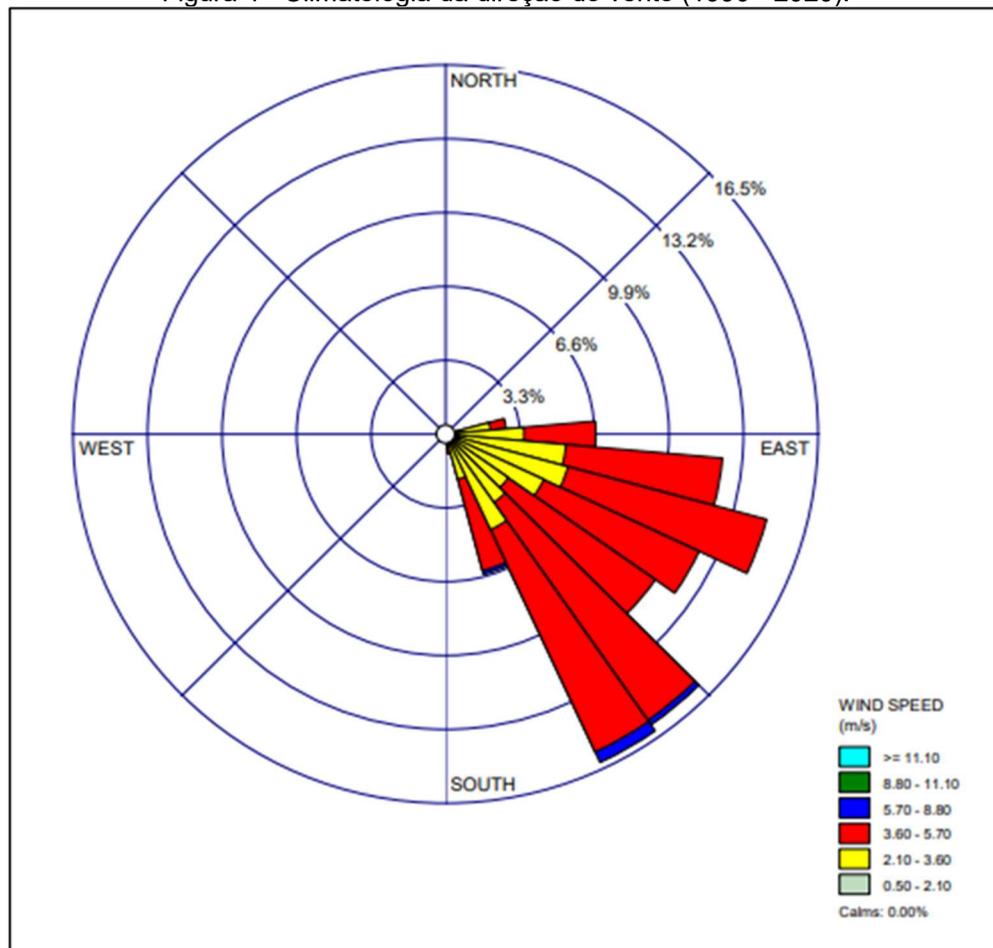
Fonte: O autor (2024).

Castelhana (2022) encontrou que a oscilação mensal da intensidade do vento para a cidade de Aracaju (SE) variou entre 3,1 m/s, para o mês de junho, e 4,3 m/s para o mês de novembro, onde os meses de maiores intensidade concentrava-se entre novembro e janeiro e os de menores intensidades entre maio e julho. O autor ainda demonstra a existência da oscilação diária sobre a velocidade do vento em Aracaju, com os valores mínimos ocorrendo na madrugada e início da manhã e o pico da velocidade ocorrendo entre 12 e 15 horas. Para a cidade de Rio do Sul (SC), Pitz *et al.* (2013) observaram que a velocidade média anual dos ventos incidentes na região era de $1,67 \pm 0,3$ m/s, com máxima velocidade de 2,04 m/s em novembro e mínima velocidade de 1,34 m/s em maio. Os autores indicam ainda que as maiores velocidades foram obtidas nos meses mais quente do ano. Castelhana e Roseghini (2018) abordam que as maiores velocidade do vento para Curitiba (PR) ao longo do ano ocorrem de setembro a janeiro, época com altas temperaturas e pluviosidade; enquanto que entre abril e julho, período menos chuvoso e frio, os ventos são menos

intensos. Para uma escala horária, existe uma oscilação na velocidade média do vento em Curitiba, com variação de 2,5 m/s a 1,3 m/s, devido ao aporte diferencial de radiação durante o dia. O regime de vento do município de Seropédica (RJ) investigado por Oliveira Júnior *et al.* (2013) é influenciado por brisas marinhas e de montanhas, devido a configuração geográfica da região, o que implica em ventos fracos e de calmaria em boa parte do ano. Os autores chamam a atenção para que a caracterização dos ventos em Seropédica seja levada em consideração em futuras concessões ambientais de instalações de atividades poluidoras do ar como forma de assegurar a saúde dos habitantes.

Em relação a direção do vento, a rosa dos ventos indica que os ventos na região são predominantes de leste/sudeste (Fig. 4), com as velocidades entre 3,6 e 5,7 m/s apresentando maior ocorrência. O conhecimento do regime do vento é utilizado pela sociedade humana em diferentes áreas como por exemplo em aspectos urbanísticos, conforto ambiental arquitetônico, produção de energia elétrica, dinâmica dos focos de incêndios, dispersão de poluentes e estudo de qualidade do ar (Barros *et al.*, 2013; Oliveira Júnior *et al.*, 2013; Castelhana e Roseghini, 2018; Souza *et al.*, 2023). Considerando a incidência anual dos ventos alísios de sudeste na região do presente estudo, espera-se que a dispersão da pluma de efluentes atmosféricos siga predominantemente na direção noroeste a partir da fonte emissora, como observado no trabalho de Nunes (2017).

Figura 4 - Climatologia da direção do vento (1990 - 2020).



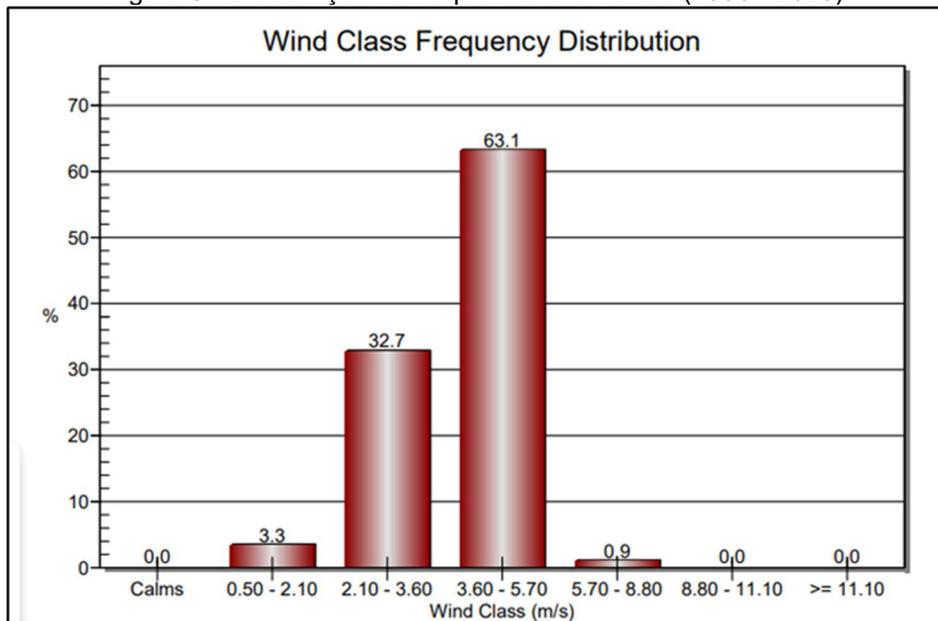
Fonte: O autor (2024).

Silva *et al.* (2023) investigaram a direção predominante do vento para as cidades pernambucanas de Recife e Caruaru. Os autores abordam que a direção do vento das duas cidades apresenta distinções e variações entre si em períodos chuvosos e secos, correlacionado o relevo como principal elemento na variabilidade da direção. A variação da direção do vento na cidade de Sergipe investigada por Castelhana (2022) é definida pelo predomínio dos ventos do quadrante leste em resposta da ação dos sistemas atmosféricos atlânticos atuantes na região. Pitz *et al.* (2013) elencam que a direção predominante do vento incidente em Rio do Sul é nor-nordeste, seguida pelas direções nordeste e sudoeste. Para a cidade de Curitiba, Castelhana e Roseghini (2018) concluem que as direções dos ventos predominantes para capital paranaense são de leste e nordeste o ano todo, com alterações ocorrendo no período diário.

A distribuição da frequência dos ventos para a região (Fig. 5) demonstra que os ventos moderados possuem maiores incidências na região, 63,1% de frequência para o intervalo de 3,60 m/s – 5,70 m/s e 32,7% para o intervalo de 2,10 m/s – 3,60

m/s; enquanto que os ventos entre 5,70 m/s – 8,80 m/s são menos comuns, com 0,9% de frequência. Gulia, Mittal e Khare (2018) elencam que as condições meteorológicas são fatores importante para a dispersão de poluentes atmosféricos. A ausência de calmaria com a prevalência de ventos moderados caracteriza a região do presente estudo com boa capacidade de dispersão de poluentes atmosféricos, assim como observado por Rosa (2012). No trabalho em questão a autora investigou a dispersão do SO₂, de origem termoelétrica, utilizando o AERMOD no município de Candiota (RS) e constatou que o regime da frequência dos ventos da região, formada por ventos moderados e poucos episódios de calmaria, auxilia de forma positiva a dispersão atmosférica de poluentes.

Figura 5 - Distribuição da frequência dos ventos (1990 - 2020).



Fonte: O autor (2024).

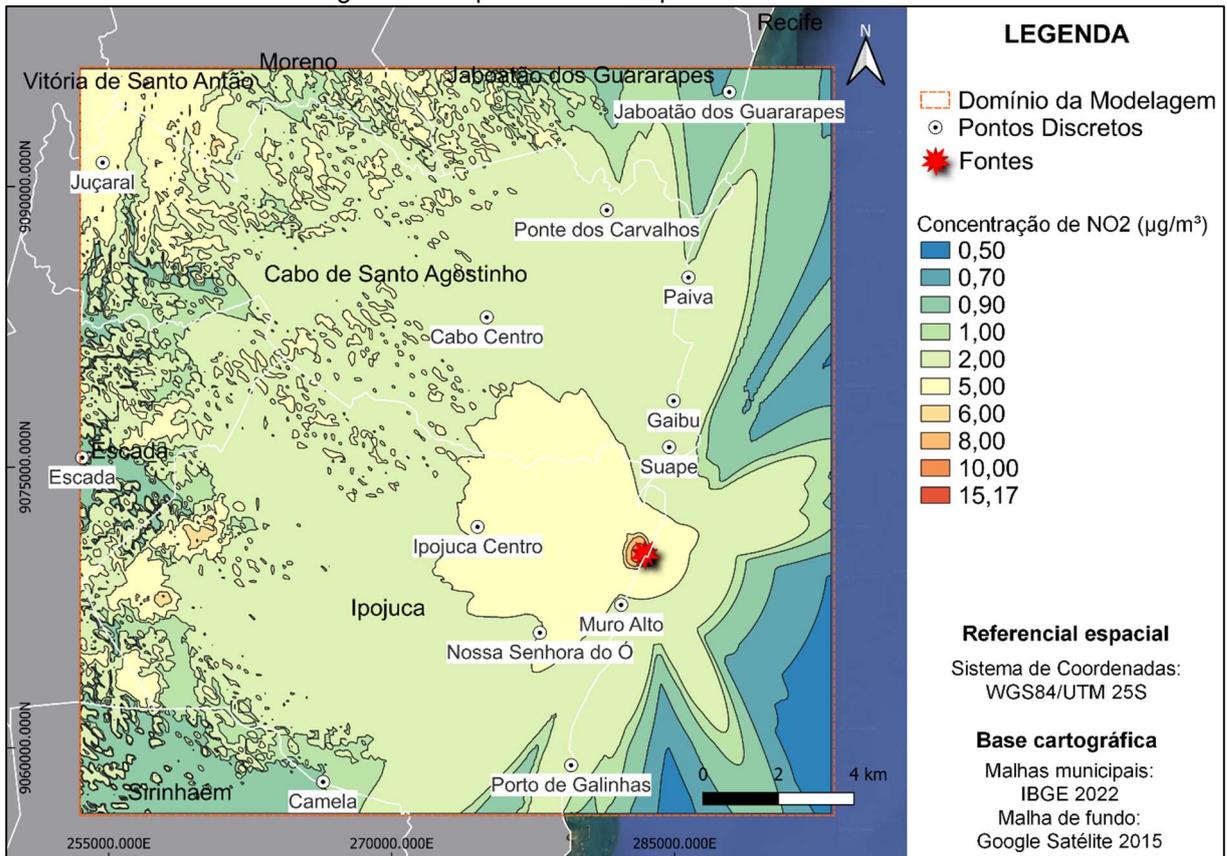
4.2 QUALIDADE DO AR

4.2.1 Dispersão de NO₂

A modelagem da dispersão do NO₂ para média horária (Fig. 6) indicou a concentração máxima de 15,17 µg/m³, valor abaixo do padrão de 260,0 µg/m³ determinado pela Resolução CONAMA 491/18, não ultrapassando o limite ambiental estipulado. A pluma apresentou dispersão em todas as direções em torno da unidade termoelétrica, em direção ao continente e ao mar adjacente, e atingiu municípios

vizinhos a Ipojuca. O intervalo das concentrações mais altas, entre $15,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $8,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, situava-se próximo do ponto de emissão, distando no máximo $1,00 \text{ km}$ das chaminés. Por outro lado, concentrações iguais ou abaixo dos $6,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ foram observadas em regiões mais distantes da fonte emissora, abrangendo toda o domínio de modelagem.

Figura 6 - Dispersão do NO_2 para a média horária.



Fonte: O autor (2024).

A dispersão da pluma em diferentes direções, observada na modelagem horária do NO_2 , deve-se ao fato de que para um curto período de tempo o vento varia sua direção muito rapidamente quando comparado a períodos de tempo maiores (Castelhano e Roseghini, 2018). Nunes (2017) ao modelar a dispersão de poluentes atmosféricos utilizando o AERMOD para a mesma região do presente trabalho encontrou concentração máxima da média horária para o NO_2 de $19,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor superior aos $15,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ encontrados no presente trabalho. O que pode explicar a diferença é que a autora em 2017 modelou a dispersão de um grupo de fontes composto por quatro empreendimentos que emitem NO_2 , ao passo que o presente trabalho investigou apenas uma atividade emissora. Nunes ainda aponta que as

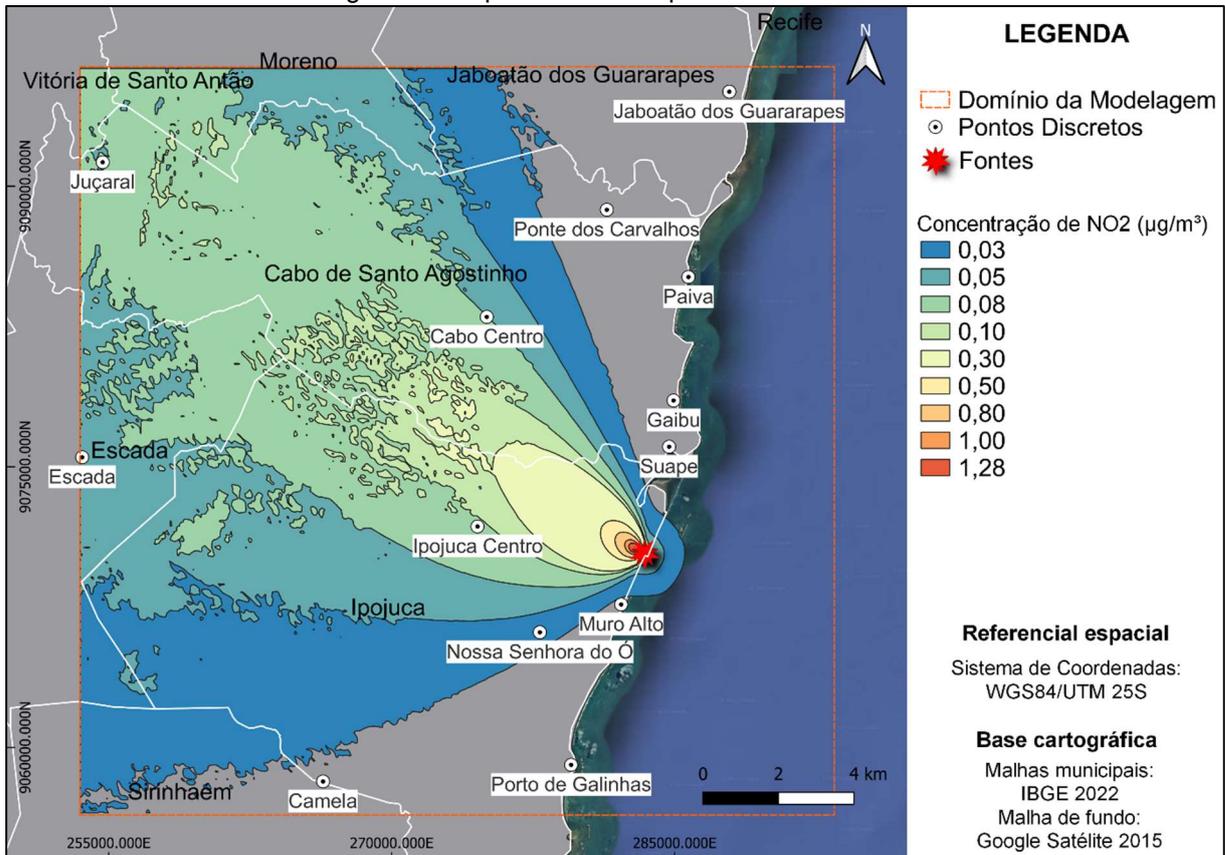
baixas concentrações modeladas para o NO₂, assim como para os demais poluentes investigados, estavam associadas as reduzidas taxas de emissões dos poluentes pelas atividades emissoras. Segundo a autora, tal fato possivelmente ocorra pelo uso de gás natural e gás liquefeito de petróleo no processo de combustão, o que gera menores taxas de emissões de poluentes atmosféricos, o que inclui o NO₂, quando comparado com o carvão mineral e outros combustíveis fósseis

A investigação da qualidade do ar na cidade de Maringá (PR) realizada por Oliveira (2012) demonstrou que as concentrações modeladas no AERMOD para os poluentes analisados (SO_x, CO, NO_x) de fontes móveis e fixas estavam dentro dos padrões da Resolução CONAMA 03/90, Resolução vigente da época, com exceção da média horária para o NO_x. A autora destaca que as altas concentrações modeladas do dióxido de nitrogênio de origem móvel (960,82 µg/m³) e fixa (65,04 µg/m³) podem afetar de forma negativa a saúde humana, o meio ambiente e os materiais e que a criação de rede de monitoramento da qualidade do ar mostra-se necessário para a medição dos níveis dos poluentes atmosféricos no município paranaense. Cerqueira (2018) ao analisar a dispersão da pluma atmosférica emitida pela Termelétrica Borborema a base de óleo combustível e óleo diesel, em Campina Grande (PB), utilizando o AERMOD encontrou a concentração máxima de 1.680 µg/m³ para a média horária do NO₂, concentração essa superior aos padrões primários (320 µg/m³) e secundários (190 µg/m³) da Resolução CONAMA 03/90 vigente na época. O autor destaca que altas concentrações (800 µg/m³) foram modeladas em áreas residenciais muito próximo da unidade termelétrica, localizadas a 350 m da fonte, e salienta a importância do uso de *softwares* para a obtenção de licenças e monitoramento ambiental para atividades poluidoras. As maiores concentrações observadas por Cerqueira (2018) em comparação com as concentrações obtidas no presente estudo devem-se a característica de baixas emissões de poluentes na queima do GN em comparação com outros combustíveis fósseis.

Irakunda *et al.* (2022) compararam dados monitorados *in situ* em três pontos receptores com a modelagem no AERMOD para a simulação do NO₂ emitido por automóveis em Kigali, capital de Ruanda. Os autores observaram que a distribuição das concentrações do poluente na cidade está relacionada com a proximidade das vias, tráfego das estradas, características específicas da cidade e horário do dia. Irakunda *et al.* (2022) encontraram ainda que as concentrações monitoradas nos três receptores e as concentrações modeladas no AERMOD foram superiores aos limites

seguros diário ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e anual ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) determinado pela OMS (Organização Mundial da Saúde). Lestari *et al.* (2022) desenvolveram um inventário das emissões de poluentes atmosféricos antropogênicos e investigaram sua distribuição espacial em Jacarta, capital da Indonésia. As emissões em 2015 do NO_x totalizaram 53 Gg (giga grama), representadas pelos setores de transportes (57%), aquecimento elétrico (24%), combustão industrial (15%) e aquecimento residencial (4%). A máxima concentração média para o intervalo de 24 h modelada pelos autores para o NO_x no AERMOD foi de $446 \mu\text{g}/\text{m}^3$, concentração essa que excedeu o padrão da qualidade do ar ambiente indonésio ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Os autores destacam que no meio ambiente o NO_x possui a capacidade de transformar em outros compostos, como o ozônio, e que sua concentração real pode ser inferior à concentração modelada. Lestari *et al.* (2022) concluem que o setor que mais contribui nas emissões atmosférica em Jacarta é o de transportes, seguido pelo setor industrial, elétrico e residencial. Gulia, Mittal e Khare (2018) avaliaram a eficiência de diferentes estratégias para o controle da poluição do ar empregadas em Delhi, capital da Índia. Os autores utilizaram um inventário de emissões em junção com o AERMOD para examinar os efeitos das práticas de controle em curso na cidade. Para o cenário de desligamento da usina térmica de Badarpur os resultados das simulações indicaram que as concentrações do NO_x reduziram em 0,05% e 0,07% no inverno e no verão, respectivamente. Entretanto, a redução do NO_x foi maior em outros cenários, como por exemplo proibição da combustão de resíduos sólidos (0,10%), rodízio de automóveis (0,50 – 1,80%) e restrição da entrada de caminhões na cidade (1,33 – 4,80%). Gulia, Mittal e Khare (2018) concluem que a utilização de estratégias de controle individuais não possui a capacidade de reduzir de forma significativa o nível de poluição do ar de Delhi, porém a combinação entre duas ou mais estratégias mostrou melhores resultados na redução da poluição do ar da cidade.

A dispersão de NO_2 médio anual modelada (Fig. 7) evidenciou a concentração máxima de $1,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, concentração essa de acordo com o padrão CONAMA 491/18 de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A dispersão ocorreu preferencialmente em direção ao continente, evidenciando o caráter dos ventos alísios de sudeste que são predominantes na região (Fig. 4), como evidenciando por Nunes (2017). Concentrações abaixo de $0,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atingiram regiões mais distantes das chaminés da termelétrica. A faixa que compreende as maiores concentrações ($1,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – $0,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) estavam nas imediações da unidade emissora, distando no máximo 2,80 km.

Figura 7 - Dispersão do NO₂ para a média anual.

Fonte: O autor (2024).

Nunes (2017) encontrou a concentração máxima de 1,08 µg/m³ para a média anual do NO₂ para a mesma área de estudo do presente trabalho, 0,20 µg/m³ a menos que os resultados atuais. Considerando que a dispersão de poluentes atmosféricos é bastante influenciada pelos fenômenos meteorológicos atuantes na região de interesse, possivelmente a diferença observada em relação ao trabalho de Nunes (2017) deva-se ao distinto intervalo de anos da base de dados meteorológicos utilizados no AERMOD. O presente trabalho utilizou como dados de entrada para o AERMET o intervalo de anos entre 2019 – 2021, como expresso no tópico 3.3.3. Certamente, os dados de entrada utilizados por Nunes (2017) foram diferentes dos utilizados no presente trabalho.

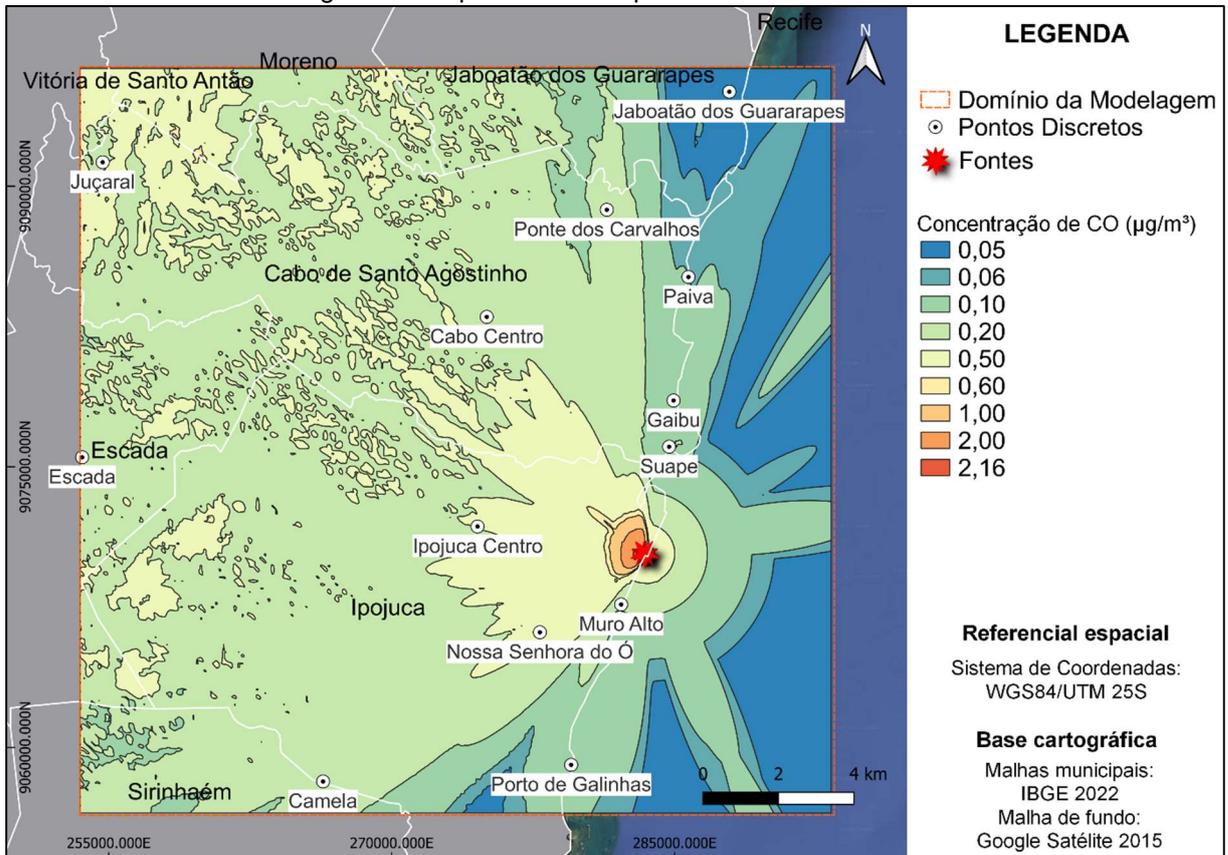
Oliveira (2012), em sua investigação da qualidade do ar de Maringá (PR), encontrou a concentração máxima anual dos NO_x em 31,28 µg/m³, valor abaixo dos padrões da Resolução CONAMA 03/90 (100 µg/m³). A autora também realizou o estudo da agressividade do meio a redes elétricas de transmissão devido ao caráter corrosivo dos NO_x e SO_x em materiais metálicos. Oliveira (2012) indica que para o

período de 2009 a cidade de Maringá apresentou corrosividade variando de baixa a média onde a dispersão do NO_x atua predominantemente nas redes elétricas na porção leste da cidade ao passo que o SO_x atua nas redes da região oeste. Melo, Lima e Gimenes (2016) estimaram as concentrações de poluentes atmosféricos emitidos por uma indústria de papel e celulose no centro-oeste do Estado do Paraná, comparando as concentrações modeladas no AERMOD com as normas nacionais e limites específicos com efeitos na saúde humana. A concentração máxima modelada para a média anual do NO_x foi de $5,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estando dentro dos padrões da Resolução CONAMA 03/90. Os autores constataram que todos os níveis de concentrações dos poluentes estavam dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90 e que as concentrações máximas modeladas dos poluentes estavam abaixo de um valor que pudessem causar algum efeito na saúde da população. Macêdo e Ramos (2020) avaliaram a poluição veicular por meio do AERMOD na cidade de Aracaju, capital sergipana. Os autores encontraram que a dispersão anual do NO_x apresentou concentração máxima de $54,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor próximo do limite de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a média anual da Resolução CONAMA 421/2018. Macêdo e Ramos (2020) concluem que as simulações indicaram que as condições meteorológicas e topográficas da capital sergipana atuam de forma positiva na dispersão de poluentes, e que a modelagem matemática e utilização do AERMOD mostrou-se adequada para o estudo da dispersão de poluentes atmosféricos.

4.2.2 Dispersão de CO

A concentração máxima modelada para o CO da média de 8 horas foi de $2,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($1,94 \times 10^{-3}$ ppm), valor muito abaixo do padrão de 9,00 ppm determinado pela Resolução CONAMA 491/18. A pluma apresentou dispersão em todas as direções a partir das fontes emissoras (Fig. 8), assim como a dispersão do NO_2 horário. O intervalo das maiores concentrações ($2,16 - 0,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) estavam distantes no máximo 3,9 km das chaminés. Nunes (2017) encontrou o valor da concentração máxima de 8 horas para a mesma área de $1,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($1,56 \times 10^{-3}$ ppm), nível semelhante ao encontrado no presente estudo. Segundo Nunes, as reduzidas taxas de emissões dos poluentes pelas atividades emissoras estavam associadas a esse cenário de baixas concentrações modeladas para o CO e para os demais poluentes investigados.

Figura 8 - Dispersão do CO para a média de 8 horas.



Fonte: O autor (2024).

Cerqueira (2018) encontrou concentrações máximas emitidas pela termelétrica Borborema para média horária ($212 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e de 8 horas ($32 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dentro dos limites da Resolução CONAMA 03/90. O autor expressa que o regime de vento da região da termelétrica apresenta frequência de calmaria abaixo dos 2% e velocidade predominante próxima aos 5 m/s o que favorece a dispersão dos poluentes atmosféricos. Rangel *et al.* (2014) analisaram a dispersão no AERMOD dos poluentes CO e $\text{MP}_{2,5}$ emitidos pela queimada pré-colheita em um canal no município de Goiana, município de Pernambuco. As concentrações máximas modeladas para ambos os poluentes estavam acima dos padrões limites estipulados pela Resolução CONAMA 03/90, $\text{MP}_{2,5}$ apresentando $496,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (limite CONAMA 03/90: $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e CO apresentando $12.915,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (limite CONAMA 03/90: $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Os autores destacam os altos níveis de comprometimento da qualidade do ar durante a prática de queimadas e indicam a necessidade de redução ou extinção dessa atividade nos canais do Brasil. Dutra *et al.* (2012) simularam a dispersão de poluentes emitidos por uma termelétrica inserida em entorno do Porto de Suape,

município de Ipojuca (PE). Os autores encontraram as concentrações máximas do CO para os meses de agosto e março em $19,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $21,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Dutra *et al.* (2012) concluem ressaltando a eficiência do AERMOD na estimação da destruição dos poluentes quando comparados com outros modelos. Melo, Lima e Gimenes (2016) em sua avaliação da qualidade do ar em contraste com a produção de papel e celulose no Estado do Paraná observaram que as concentrações máximas do CO para o intervalo de 8 horas ($13,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e diário ($5,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$) estavam dentro dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90. Os autores apontam que as áreas modeladas com as maiores concentrações correspondiam as áreas mais próximas da fonte de emissão. Macêdo e Ramos (2020) encontraram a concentração máxima do CO para média de 8 horas de $27.560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (22,34 ppm) emitido por fontes veiculares, ultrapassando o limite de 9 ppm determinado pela Resolução CONAMA 491/18. Os autores expressam que os elevados níveis de concentração para o CO decorrem das elevadas taxas de emissões das vias investigadas, que chegaram a $35,82 \text{ g/s}$ de CO. Lestari *et al.* (2022) apresentam que dos 144 Gg de CO emitidos em 2015 em Jacarta, 93% (137,7 Gg) foram emitidos pelo setor de transportes. A distribuição espacial das emissões sobre a capital da Indonésia indicou que as maiores emissões de CO estavam concentradas principalmente no centro da cidade, onde há maior atividade urbana. Os autores também observaram que as maiores concentrações dos poluentes estavam localizadas em regiões centrais de Jacarta. A concentração média diária do CO modelada no AERMOD foi de $2.387 \mu\text{g}/\text{m}^3$, concentração essa abaixo do padrão indonésio de qualidade do ar ambiente ($10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

4.3 MONITORAMENTO DOS PONTOS DISCRETOS

A Figura 9 apresenta os níveis máximos da concentração da média horária do NO_2 para os treze pontos discretos inseridos na malha de modelagem. Os pontos discretos no eixo X estão dispostos em ordem crescente de modo a representar sua distância em relação as chaminés da termoelétrica. A distância mínima é de 3,00 km entre as chaminés e Muro Alto, enquanto que a distância máxima é de 35,34 km, entre as chaminés e Juçaral. A concentração máxima modelada para o NO_2 para a média horária foi de $15,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como expresso anteriormente no item 4.2.1, estando dentro dos padrões do CONAMA 491/18 ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Entre os pontos discretos investigados,

a maior concentração foi observada em Juçaral ($4,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguida por Nossa Senhora do Ó ($2,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ipojuca Centro ($1,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e Praia de Muro Alto ($1,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 9 - Concentrações máximas do NO_2 da média horária nos pontos discretos.



Fonte: O autor (2024).

Juçaral é um distrito localizado na porção noroeste do município de Cabo de Santo Agostinho e apresenta a maior distância com o ponto de emissão. A maior concentração observada em Juçaral pode ser explicada devida a sua maior elevação em comparação aos demais pontos investigados (Tabela 2) além da sua posição sobre a direção preferencial da dispersão da pluma. Macêdo e Ramos (2020) elencam que a cidade de Aracaju possui topografia predominantemente plana, o que auxilia a dispersão dos poluentes atmosféricos. Os autores apontam que, diferentemente do observado em Aracaju, locais com altos relevos promovem condições atmosféricas estáveis e dificultam a dispersão atmosférica de poluentes, possivelmente o caso para Juçaral. Por sua vez, os pontos correspondes a Nossa Senhora do Ó, Ipojuca Centro e Praia de Muro Alto são pontos pertencentes ao município de Ipojuca e estão localizados próximos da termoelétrica, distando todos eles menos de 10 km do ponto de emissão. Logo, para esses pontos em especial os maiores níveis do NO_2 para média horária ocorreram devido a sua proximidade com as fontes emissoras. Maiores concentrações próximas das áreas fontes também foram observadas em outros trabalhos (Paz *et al.*, 2007; Dutra *et al.*, 2012; Rangel *et al.*, 2014; Cerqueira, 2018; Borges *et al.*, 2021; Lestari *et al.*, 2022).

Todas as concentrações modeladas para a média anual do NO₂ nos pontos discretos não ultrapassaram 0,10 µg/m³. As maiores concentrações foram obtidas em Ipojuca Centro (0,08 µg/m³), Juçaral (0,06 µg/m³), Cabo Centro (0,05 µg/m³) e Escada (0,04 µg/m³) (Fig. 10). O maior nível de concentração na área modelada para a média anual foi de 1,28 µg/m³, valor de acordo com o padrão do CONAMA. Foi observado no item 4.1 a predominância das direções do vento de leste e sudeste sobre a região estudada, o que foi confirmado na modelagem anual para o NO₂ (Fig. 7) com a pluma sendo direcionada majoritariamente para a direção noroeste, em sentido ao continente, a partir da termoelétrica.

Figura 10 – Concentrações anual do NO₂ médio anual nos pontos discretos.



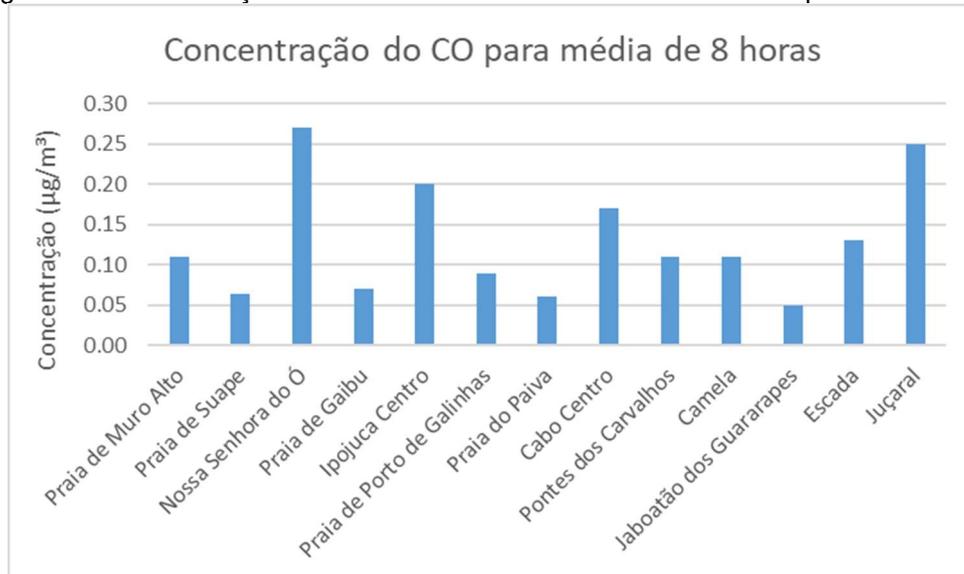
Fonte: O autor (2024).

Ipojuca Centro, Juçaral, Cabo Centro e Escada apresentam diferentes distâncias com a termoelétrica, variando entre 8,99 km – 35,54 km, porém suas posições em relação a termoelétrica estão confinadas entre oeste e noroeste. Na dispersão anual para o NO₂ é evidente que esses quatro pontos estão localizados sobre ou muito próximos da direção preferencial de deslocamento da pluma, a noroeste, reflexo da atuação dos ventos de leste – sudeste na região. Assim, ao longo do período anual, é indicado que a principal influência sobre o nível de concentração dos poluentes nas áreas adjacentes à termoelétrica é determinada pela posição relativa desta em relação à direção preferencial de dispersão da pluma. A atuação da direção preferencial do vento na dispersão de poluentes atmosféricos também foi observada por Cerqueira (2018). No trabalho em questão o autor encontrou que a

dispersão anual da pluma emitida pela Usina Termelétrica Borborema, em Campina Grande, ocorreu de acordo com as direções do vento sudeste e leste predominantes na região investigada. O autor encontrou concentração máxima do NO_2 de $13,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a Usina Borborema, valor esse abaixo do padrão de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da Resolução CONAMA 03/90 vigente em 2018. Outras pesquisas exemplificam a relação da direção do vento predominante e a dispersão de poluentes em outras regiões do Brasil (Paz *et al.*, 2007; Alves, 2012; Oliveira, 2012; Melo, Lima e Gimenes, 2016; Castelhana e Roseghini, 2018; Macêdo e Ramos, 2020; Borges *et al.*, 2021) e do mundo (Gulia, Mittal e Khare, 2018; Lestari *et al.*, 2022; Irankunda, 2022).

A concentração máxima modelada para o CO em 8 horas para a região investigada foi de $2,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, abaixo dos 9 ppm ($10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) determinado pela Resolução CONAMA 491/18. Nossa Senhora do Ó, Juçaral, Ipojuca Centro e Cabo Centro foram os pontos que apresentaram maiores níveis de concentração com $0,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente (Fig. 11).

Figura 11 - Concentrações máximas do CO da média de 8 horas nos pontos discretos.



Fonte: O autor (2024).

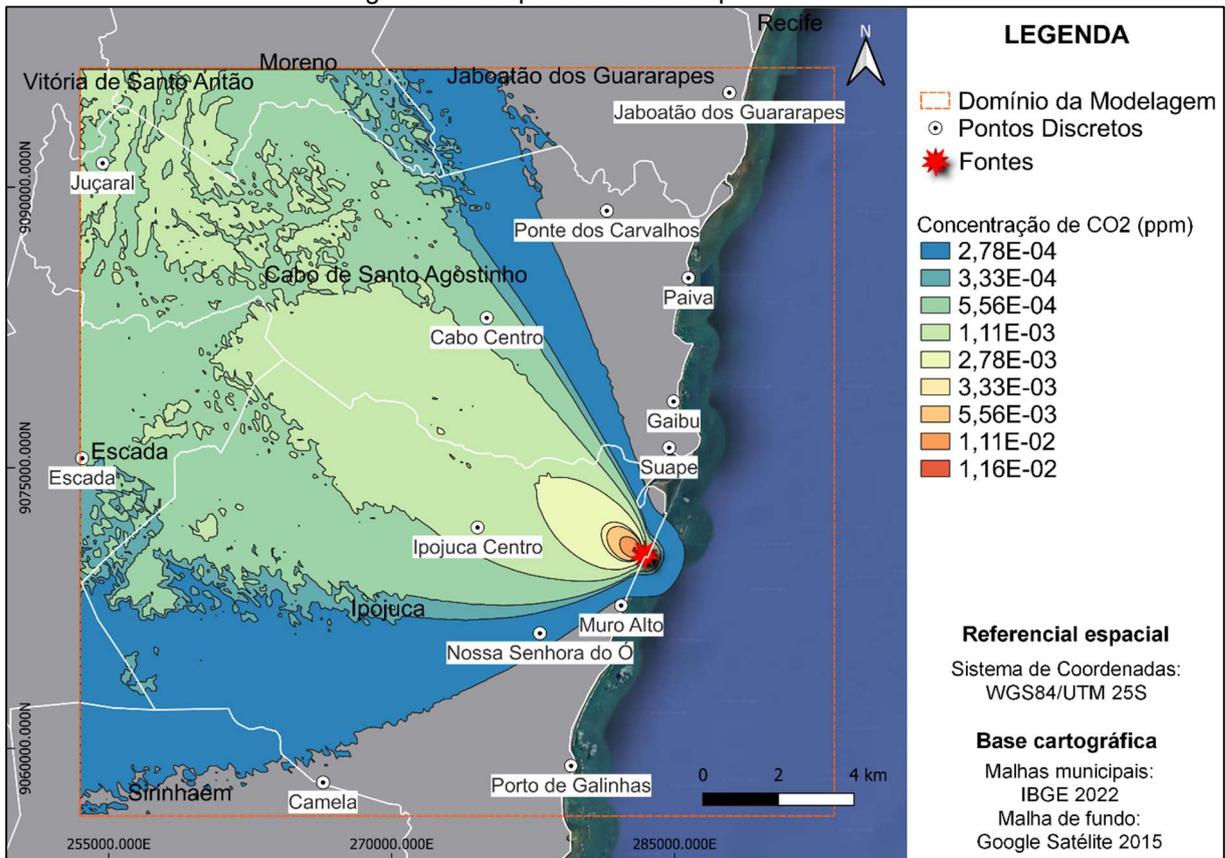
A maior concentração observada em Nossa Senhora do Ó pode ser correlacionada com sua proximidade com as chaminés da termoelétrica (7,01 km), ao passo que para Juçaral, onde foi observado a segunda maior concentração, a direção preferencial dos ventos na região em conjunto com o alto relevo desse local pode explicar o nível modelado encontrado nesse ponto. Os altos níveis em Ipojuca Centro e Cabo Centro podem ser correlacionados com a proximidade da fonte, no caso de

Ipojuca Centro (8,99 km), e, assim como Juçaral, as suas posições sobre a direção preferencial da dispersão da pluma. A Figura 8 ilustra a dispersão do monóxido de carbono ocorrendo em todas as direções a partir das fontes emissoras. Para um intervalo de tempo curto, o vento altera rapidamente sua direção devido aos sistemas locais de meso-escala atuantes na região, como por exemplo o sistema de brisa que ocorrem a cada 12 horas (Teixeira, 2008; Melo, Aragão e Correia, 2013). Nakagawa, Comarú e Trigoso (2010) abordam que as condições meteorológicas influenciam a concentração dos poluentes ao decorrer do tempo. Os autores observaram que para a cidade de São Paulo nos meses mais frios as concentrações de CO emitido por uma termoelétrica aumentam devido as características pouco favoráveis à dispersão nessa época. Os autores indicam que baixas temperaturas, pouco vento e baixa umidade afetam de forma negativa a dispersão atmosférica contribuindo para maiores níveis de poluentes na cidade.

Em termos gerais, constatou-se que a concentração, modelada em um ponto de interesse, apresentou variações significativas devido às características combinadas, tais como a distância em relação à fonte, a posição relativa à fonte, a elevação, o intervalo de tempo modelado e as condições meteorológicas atuantes durante esse período. Vale destacar mais uma vez que a concentração máxima dos poluentes NO₂ e CO estavam dentro dos padrões estipulados pela Resolução CONAMA 491/18 para toda a área modelada, o que inclui os todos os treze pontos discretos.

4.4 ÁREAS DE CAPTURA E ESTOQUE DE CARBONO

A pluma de CO₂ cobriu uma área total de 95.655,60 ha, correspondendo a 59,78% da área modelada, sobre os municípios de Ipojuca (39.192,77 ha), Cabo de Santo Agostinho (33.824,34 ha), Escada (10.080,51 ha), Moreno (5.409,16 ha), Sirinhaém (3.869,12 ha), Jaboatão dos Guararapes (2.607,26 ha) e Vitória de Santo Antão (672,44 ha) (Fig. 12).

Figura 12 - Dispersão anual da pluma de CO₂

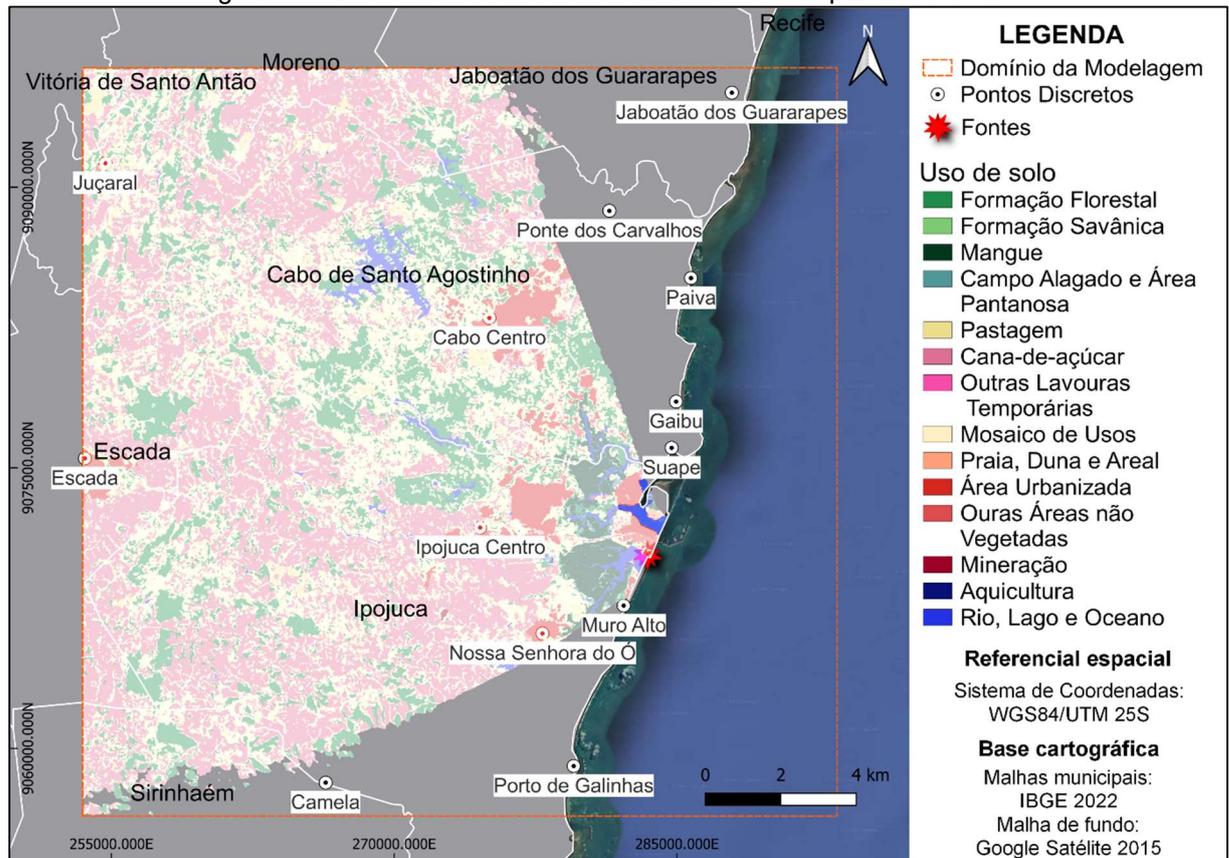
Fonte: O autor (2024).

O intervalo da concentração do CO₂ foi de $2,78 \times 10^{-4}$ ppm – $1,16 \times 10^{-2}$ ppm, onde as maiores concentrações, $3,33 \times 10^{-3}$ ppm – $1,16 \times 10^{-2}$ ppm, estavam mais próximas da fonte, distante no máximo 2,60 km das fontes emissoras. Em sua investigação da dispersão dos gases CH₄ e CO₂, emitidos a partir de aterros sanitários na capital do Kuwait, Elmi *et al.* (2021) observaram que a concentração do CO₂ variou sazonalmente. Os autores utilizaram o AERMOD para modelar a dispersão dos gases e obtiveram concentração máxima de 464 mg/m³ (257,78 ppm) no inverno e mínima de 119 mg/m³ (66,11 ppm) no verão. Os autores ainda expressam que a partir da modelagem foi possível indicar que regiões residenciais próximas aos aterros estão na direção preferencial da dispersão atmosférica, o que pode impactar a saúde humana. Kose, Sekban e Ozkok (2021) utilizando o AERMOD investigaram as emissões atmosféricas originárias de navios para o porto de Trabzon, localizado no nordeste da Turquia. A concentração máxima anual modelada para o CO₂ foi de 3.271,69 µg/m³ (1,82 ppm), abrangendo áreas portuárias, residenciais e marinhas. Os autores ainda indicam que entre os gases modelados (CO, CO₂, NO₂, NO_x, SO₂), o

CO₂ correspondeu a 97% das emissões totais dos navios. Mousavi *et al.* (2021) aplicaram o AERMOD na análise das emissões de CO₂, CO e SO₂ a partir de *flares* de queima contínua e não contínua em uma refinaria de gás natural em Ahvaz, no Irã. Foi observado que as concentrações do CO₂ para média de 8 horas eram maiores na estação fria, 447,73 ppm e 4.913,41 ppm, em comparação com a estação quente, 158,40 ppm e 2.752,03 ppm, para ambas as operações de queima. As baixas concentrações do CO₂ observadas no presente estudo, quando comparado com as pesquisas supracitadas, podem ser explicadas devido as condições climáticas favoráveis para a dispersão de poluentes atmosféricos como a ausência de calmarias, expresso no item 4.1. Além disso, os dados de entrada para a taxa de emissão de CO₂ da unidade termoelétrica correspondem aos dados mais recentes disponíveis, referentes ao ano de 2022, que registrou a menor emissão em comparação com anos anteriores.

Dados do IEMA (2023) apontam que para o ano de 2022 a unidade termoelétrica investigada emitiu 7.000 t de CO₂, enquanto que nos anos de 2021 e 2020 as emissões totalizaram 1.239.000 t e 940.000 t, respectivamente (IEMA, 2022a; IEMA, 2022b; IEMA, 2023). A menor emissão observada em 2022, em comparação aos dois anos anteriores, foi resultado de condições favoráveis à geração hidrelétrica além do crescimento de outras fontes renováveis nesse mesmo ano (IEMA, 2023). Fato esse que reflete a importância das fontes renováveis no processo de descarbonização do setor energético, atuando como peça essencial na transição energética mundial e nacional, como indicado em publicações anteriores (EPE, 2018; EPE, 2020; IPEA, 2020).

De acordo com dados do MapBiomass, os principais usos de solo na área sobre influência da pluma de CO₂ são a agropecuária (75,63%) e a florestal (18,06%), seguidos por áreas não vegetadas (4,15%), corpos d'água (2,00%) e formação natural não florestal (0,16%) (Fig. 13). As áreas vegetadas, florestas e agropecuária, que podem atuar na captura e/ou estocagem do dióxido de carbono somaram cerca de 89.621,19 ha e representaram 93,69% da área sobre influência da pluma. Os principais locais de vegetação incluíram mosaico de uso (37,01%), plantação de cana-de-açúcar (36,61%), formação florestal (16,37%), pastagem (2,01%) e mangue (1,68%).

Figura 13 - Diferentes usos de solo sob influência da pluma de CO₂.

Fonte: O autor (2024).

Conforme o documento do MapBiomias, que descreve sua coleção, a classificação do mosaico de uso abrange áreas de uso agropecuário em biomas nativos (caatinga, cerrado, mata atlântica, pampa) onde não foi possível distinguir entre pastagem e plantio, além de incluir regiões urbanizadas que contêm tanto vegetação natural quanto cultivada (MapBiomias, 2024). A mudança do uso do solo é uma das atividades que mais emite GEE para a atmosfera, como apontando pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG (2023). No documento em questão, a organização aponta que para o ano de 2022 a atividade agropecuária no Brasil foi responsável pela emissão de 617,2 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, correspondendo a segunda atividade mais emissora no país, ficando atrás somente das mudanças de uso de terra. Em Pernambuco, o setor agropecuário ocupa cerca de 45% do seu território (IBGE, 2022). Machado (2005) expressa que com a expansão da agropecuária em áreas de vegetação nativa a capacidade de captura natural do CO₂ realizado pelos biomas diminui ao passo que as emissões por esse setor aumentam. O autor também aponta que a adoção do plantio direto na produção agrícola contribui para o sequestro de carbono do solo, o

que por sua vez pode minimizar os impactos das mudanças climáticas. Carvalho *et al.* (2010) discutem diferentes estratégias presentes na literatura científica passíveis de serem utilizadas na agricultura e na mudança do uso de terra que podem mitigar as emissões e aumentar o sequestro de carbono dessas atividades. Os autores concluem que para a atividade agropecuária o uso do manejo adequado do solo pode resultar no aumento dos estoques de carbono pela vegetação concomitante com a diminuição dos efeitos do aquecimento global.

A importância do cultivo da cana-de-açúcar para a região entorno da unidade termoelétrica é bastante notável quando constatado que as áreas destinadas ao seu plantio totalizam 35.023,32 ha, aproximadamente 37% da área sobre influência da pluma. A cana-de-açúcar é uma das culturas brasileiras de destaque, apresentando produção em torno dos 724,43 milhões de toneladas e valor de produção em R\$ 93,47 milhões de reais para o ano de 2022 (IBGE, 2024). O maior produtor nacional é o Estado de São Paulo, que responde por 58% da produção. Pernambuco representa 2% da produção nacional. O setor sucroalcooleiro brasileiro apresenta grande potencial para obtenção da classificação de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), proposto pelo protocolo de Kyoto, para poder receber e vender os Certificados de Emissões Reduzidas, como é apresentado no trabalho de Meneguello e Castro (2007). Os autores abordam que o mercado de créditos de carbono pode beneficiar esse setor por representar mais uma fonte de renda e melhorar sua aceitação perante a opinião pública. Meneguello e Castro (2007) também expressam que para a obtenção do MDL as usinas de cana-de-açúcar brasileiras devem diminuir a queima nos canaviais e destinar a palha da cana-de-açúcar para a geração de energia através de sua biomassa, que captura de forma natural o CO₂ atmosférico, representando dessa forma uma economia circular do carbono. Assim como a utilização do bagaço para a geração elétrica, a produção de etanol representa um dos componentes da economia circular do carbono. Machado *et al.* (2017) destacam a posição de liderança do Brasil em termos de produção de etanol a base de cana-de-açúcar, devido às boas condições de solo e clima do país. A produção de biocombustíveis é apontada como uma das soluções-chaves para a mitigação dos GEE em paralelo com a redução da utilização de combustíveis fósseis. Os autores discutem que o etanol é um biocombustível que pode ser originado por outras diferentes culturas, como por exemplo milho, beterraba, arroz e mandioca. Em sua pesquisa foi realizada a estimativa e comparação das emissões de CO₂ por espécies agrícolas distintas (cana-

de-açúcar, beterraba, milho, arroz e mandioca). Os resultados demonstraram que a influência da pegada de carbono na produção do etanol difere com o tipo de cultura utilizada. O milho e a cana-de-açúcar foram as matérias-primas mais sustentáveis para a produção do biocombustível. Porém, vantagens nas instalações indústrias brasileiras, questões econômicas e ambientais transformam o etanol de cana-de-açúcar mais vantajoso em comparação ao milho e as demais culturas. A utilização do etanol, em comparação com derivados de petróleo, emite menos CO₂ para a atmosfera, como abordado no trabalho de Soares *et al.* (2009). No trabalho em questão os autores compararam as emissões de automóveis quando utilizado de forma integral a gasolina e o etanol de cana-de-açúcar. A pesquisa levou em consideração as emissões dos GEE de todas as etapas da produção de ambos os combustíveis. Os resultados demonstraram que houve uma redução de 73% das emissões de CO₂ quando utilizado integralmente o etanol, em comparação com a gasolina pura. Os autores também apontam que quando comparado o etanol e o diesel, as emissões reduzem em 68% com a utilização do etanol.

A formação florestal compreende as espécies vegetais dos seis biomas brasileiros (MapBiomas, 2024). As mudanças de uso de terra no Brasil, que incluem a devastação dos biomas, foram responsáveis pela emissão de 1,12 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente em 2022, correspondendo a atividade que mais emitiu GEE no ano em questão (SEEG, 2023). Como expresso por Carvalho *et al.* (2010), uma das estratégias para mitigar as emissões de GEE corresponde a redução das taxas de desmatamento. Os autores ainda apontam que os biomas brasileiros apresentam diferentes potencial de captura e sequestro do carbono atmosférico. Para a região de interesse do presente estudo, a Mata Atlântica é o bioma predominante para toda a área de modelagem. Verly *et al.* (2023) realizaram a estimativa do estoque de carbono aéreo em fragmentos da Mata Atlântica com diferentes estágios sucessionais (inicial, intermediário e avançado) no campus da Universidade Federal de Viçosa, no município de Viçosa (MG). A pesquisa indicou que o estoque médio de carbono nos fragmentos avançado (82,28 Mg/ha) da Mata Atlântica foi superior em cerca de três vezes em relação aos fragmentos iniciais (24,99 Mg/ha). Os autores concluem o estudo sinalizando para a importância da conservação da vegetação secundária da Mata Atlântica diante do seu papel natural de reservatório de carbono. Azevedo *et al.* (2018) discutem a importância dos ecossistemas florestais no processo de estocagem do carbono atmosférico. Os autores avaliaram a biomassa e o estoque

de carbono em diferentes compartimentos em áreas de reflorestamento da Mata Atlântica no município de Cachoeiras de Macacu (RJ). Os resultados do estudo apontaram que quanto mais velho o reflorestamento, mais biomassa e estoque de carbono as áreas apresentaram. Entre suas conclusões, os autores citam que o gradiente de carbono observado em função da idade dos plantios de reflorestamento demonstra o papel de fixação e sequestro desse bioma que apresenta potencial para a mitigação de GEE. Villanova *et al.* (2019) avaliaram a dinâmica de crescimento de carbono para os anos de 2010 e 2015 em um fragmento secundário da Mata Atlântica localizado no Parque Tecnológico de Viçosa, na cidade de Viçosa (MG). Os resultados apresentaram que houve um crescimento de estoque de carbono em 2,00 MgC/ha.ano em função da progressão sucessional desse bioma. Os autores concluem que a Mata Atlântica, mesmo ao decorrer das mudanças climáticas, possui o papel de atuar como sumidouro de carbono e, concomitante, na diminuição dos GEE.

Pastagem é caracterizada por áreas destinada diretamente à atividade agropecuária (MapBiomass, 2024). De 2000 a 2020, a pastagem com manejo no Brasil cresceu 27,9% (247 mil km²), ao passo que a vegetação natural diminuiu 7,9% (320,7 mil km²) (IBGE, 2022). O maior crescimento da pastagem foi observado no Estado do Pará, com crescimento de 87,8 mil km², ao passo que sua vegetação natural reduziu em 123,2 mil km². O crescimento do uso de solo para pastagem é explicado pelo aumento do número de rebanho bovinos, principalmente na região Norte do Brasil. O IBGE ainda destaca a redução progressiva observada ao longo do tempo para as áreas florestal e campestre, salientando a importância desses ecossistemas naturais em seus papéis de prover serviços ecossistêmicos à população. Rosendo e Rosa (2012) realizaram a investigação e comparação da quantidade de carbono estocado em solos utilizados como pastagem e solos da vegetação nativa de cerrado, para a bacia hidrográfica do rio Araguari (MG). Os resultados da pesquisa indicaram que o carbono estocado na camada superficial, 0 – 20 cm, foi superior no solo da pastagem melhorada (43,92 MgC/ha), seguidas pelo do cerrado (38,05 MgC/ha) e da pastagem degradada (34,63 MgC/ha). Por sua vez, nas camadas mais profundas, 20 – 40 cm, a quantidade de carbono estocado para a pastagem melhorada, pastagem degradada e cerrado foram 33,50 MgC/ha, 27,51Mg/ha e 26,80 MgC/ha, respectivamente. Os autores concluem que a pastagem melhorada e bem manejada possui a capacidade de atuar como sequestrador de carbono, quando comparada com a vegetação do

bioma cerrado; ao passo que pastagens degradadas atuam como fonte de carbono. Por sua vez, Kimura e Santos (2016) realizaram a valoração da mitigação dos GEE da utilização da recuperação de pastagem através do financiamento brasileiro de crédito do Programa Agricultura de Baixa Emissão de Carbono. O custo marginal de abatimento de GEE na recuperação de pastagem foi calculado em R\$ 24,72/tCO_{2e}, indicando que a produção de alimento pode ocorrer com responsabilidade ambiental e ganhos econômicos. Os autores expressam que o crescimento da agropecuária com o emprego da recuperação de pastagem auxilia na expansão da produção alimentar brasileira de forma sustentável.

Apesar da pequena parcela dos manguezais (1.609,38 ha) em relação às demais vegetações, o ecossistema de manguezal é reconhecido como um dos sistemas costeiros mais eficientes globalmente na captura e armazenamento de carbono, acumulando cerca de dez vezes mais carbono do que as florestas secas (Kauffman *et al.*, 2018b). Neto e Silva (2023) investigaram a formação dos estoques de carbono nos manguezais brasileiros por meio de uma revisão de literatura. Os autores identificaram que o estoque do carbono nos ecossistemas do Brasil estimados em trabalhos varia entre 358,79 MgC/ha – 1.851,00 MgC/ha, com estoque médio de 709,36 MgC/ha. É destacado ainda que o ecossistema de manguezal apresenta notória relevância a nível global pelo seu papel de sequestro e estoque de carbono, aprisionando grandes quantidades desse gás, entre 4,19 – 6,6 PgC, e contribuindo para a redução dos GEE na atmosfera. Em uma de suas conclusões, é apontado que os fatores antrópicos que mais afetam os manguezais brasileiros são a mudança de uso e ocupação de solo e a poluição. Considerando os impactos antrópicos nos manguezais relacionados à mudança no uso e ocupação do solo, destaca-se a pesquisa de Kauffman *et al.* (2018a). No trabalho em questão foram determinados, a fim de comparação, os estoques de carbono de florestas naturais de mangues e viveiros de camarão nas bacias hidrográficas de Acaraú e Jaguaribe, no Ceará. Os autores encontraram que nas áreas de conversão de manguezais em viveiros houveram perdas dos estoques de carbono entre 58% a 82%, o equivalente a 182 anos de acumulação de carbono no solo. Os resultados obtidos também apresentam que para a conversão das áreas naturais em viveiros de camarão foram emitidos em média 1.390 MgCO_{2e}/ha.

5 CONCLUSÃO

A transição energética é um processo importante no qual as formas de produzir e consumir energia caminham em direção ao alinhamento entre desenvolvimento e sustentabilidade. Mudanças na matriz energética mundial já estão em curso, criando dessa forma espaço para o aumento da utilização de fontes de energias menos poluentes em termos de emissões de GEE. Para o Brasil, a utilização das termoelétricas a gás natural garantem a segurança elétrica nacional, em cenários adversos ao uso das hidroelétricas, ao mesmo tempo em que podem impactar a qualidade do ar nas regiões em que operam.

O presente estudo verificou que a utilização do AERMOD na modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos, oriundos de uma termoelétrica, resulta em dados valiosos para o estudo da qualidade do ar entorno do empreendimento assim como identificação de áreas potenciais para a mitigação do CO₂. Todas as concentrações modeladas para os poluentes NO₂ e CO estavam abaixo dos padrões estipulados pela Resolução CONAMA 491/2018. As condições climáticas da região investigada demonstraram condições favoráveis para a dispersão de tais poluentes para toda a área de modelagem, incluindo todos os treze pontos discretos.

A modelagem do CO₂ indicou níveis de concentrações abaixo do que observado em outros trabalhos, correspondendo possivelmente às baixas taxas de emissões modeladas em conjunto com as características climáticas da região favoráveis a dispersão. Os diferentes usos de solo sobre influência da dispersão da pluma de efluentes apresentam distintas capacidades de estocar ou emitir CO₂, sendo evidenciado a agropecuária como principal uso de terra para essa região. A adoção das práticas de mitigação dos GEE também estão presentes para esse setor em e podem contribuir para as reduções de suas emissões. As formações florestais da Mata Atlântica em conjunto com a parcela dos manguezais são conhecidas na literatura por sua capacidade de captura e estocagem de grandes quantidades do CO₂ atmosférico, sendo importante a preservação das suas características naturais a fim de garantir sua função ecossistêmica.

Os resultados obtidos nesta pesquisa têm o potencial de serem essenciais para direcionar as decisões dos gestores do empreendimento em relação à implementação de medidas de mitigação para reduzir suas emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA CAMARA DE NOTÍCIAS. Câmara aprova projeto que regulamenta o mercado de carbono no Brasil.
- ALONSO, C. D., GODINHO, R. A evolução da qualidade de ar em Cubatão. *Química Nova*, 15(2), 126 – 136, 1992.
- AZEVEDO, A. D., *et al.* Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. *Florestas*, Curitiba, PR, v. 28, n. 2, p. 183 – 194, abr./jun., 2018.
- PAZ, S. R., *et al.* Utilização de modelagem numérica para o estudo da dispersão de poluentes emitidos pela usina termoeletrica Presidente Médici. *Química Nova*, v. 30, n. 7, p. 1609 – 1605, 2007.
- AMIRKHANI, M. *et al.* *Extreme weather events and death based on temperature and CO2 emission – A global retrospective study in 77 low-, middle- and high-income countries from 1999 to 2018. Preventive Medicine Reports*, v. 28, 101846, mai., 2022.
- ARAÚJO, M., *et al.* *On the variability in the CO2 system and water productivity in the western tropical Atlantic off North and Northeast Brazil. Journal of Marine Systems*, v. 189, jan., p. 62 – 77, 2019.
- BARROS, J. D., *et al.* Sazonalidade do vento na cidade de Natal/RN pela distribuição de Weibull. *Sociedade e Território*, Natal, v. 25, n. 2, p. 78 – 92, jul./dez., 2013.
- BORGES, R. R., *et al.* Modelagem da dispersão atmosférica de material particulado (MP₁₀) e os impactos da utilização de veículos de carga movidos a GBL em São Paulo. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 41, e185818, 1 – 13, 2021.
- BRASIL. Lei N° 6.938, de 31 de agosto de 1981. Política Nacional do Meio Ambiente. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2 set. 1981.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA N° 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, 25 ago. 1989.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA N° 3, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 22 ago. 1990.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Decreto N° 3.371, de 24 de fevereiro de 2000. Programa Prioritário de Termoeletricidade. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 25 fev. 2000.
- BRASIL. Lei N° 10.165, de 27 de dezembro de 2000. Altera a Lei N° 6.938, de 31 de agosto de 1981, que 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, 27 dez. 2000.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Departamento de Ciência e Tecnologia. Síntese de evidências para políticas de saúde: reduzindo a emissão do poluente atmosférico – material particulado – em benefício da saúde no ambiente urbano. Brasília: Ministério da Saúde/EVIPNet Brasil, 2016. 52 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 nov. 2018.

BRASIL. Lei Nº 14.134, de 8 de abril de 2021. Nova Lei do Gás. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 abr. 2021.

BRASIL. Lei Nº 14.182, de 12 de julho de 2021. Dispõe sobre a desestatização da empresa Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras); altera as Leis nºs 5.899, de 5 de julho de 1973, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, 10.848, de 15 de março de 2004, 13.182, de 3 de novembro de 2015, 13.203, de 8 de dezembro de 2015, 14.118, de 13 de janeiro de 2021, 9.648, de 27 de maio de 1998, e 9.074, de 7 de julho de 1995; e revoga dispositivos da Lei nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 jul. 2021.

BRAISL. Decreto Nº 11.075, de 19 de maio de 2022. Estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa e altera o Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 mai. 2022.

BUENO, M. A.; PINHEIRO, A. C. Atlas Escolar Geográfico, Histórico e Cultural do Ipojuca. Recife: Informe – Tecnologia Integrada à Educação, 2016.

CARDU, M., BAICA, M. *Regarding a global methodology to estimate the energy-ecologic efficiency of thermopower plants. Energy Conservation and Management*, v. 40, 1, p. 71 – 87, jan., 1999.

CARVALHO, J. L. N. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 2, p. 277 – 289, abr., 2010

CARVALHO, J. F. Energia e sociedade. *Estudos Avançados*, 28 (82), p. 25 – 39, 2014.

CASTELHANO, F. J., ROSEGHINI, W. F. F. Caracterização da dinâmica dos ventos em Curitiba – PR. *Geosp – Espaço e Tempo*, v. 22, n. 1, p. 227 – 240, 2018.

CASTELHANO, F. J. Análise da dinâmica dos ventos em Aracaju/Sergipe. *OKARA: Geografia em Debate*, v. 16, n. 1, p. 125 – 135, 2022.

CERQUEIRA, J. S. Consequências do funcionamento da usina termelétrica Borborema S.A. para a Região Metropolitana de Campina Grande-PB. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, p. 279, 2018.

CIMORELLI, A. J. *et al.* AERMOD: a dispersion model for industrial source applications. part I: general model formulation and boundary layer characterization. *Journal of Applied Meteorology*, v. 44, p. 682 – 693, mai. 2005.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade do ar no Estado de São Paulo. Série Relatórios, São Paulo, 2019.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Ficha de informação toxicologia: dióxido de enxofre. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental, 2021.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Ficha de informação toxicologia: monóxido de carbono. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental, 2022.

CONDEPE – FIDEM. Produto Interno Bruto dos Municípios 2020. Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco. Recife: CONDEPE – FIDEM, 2020.

CNI – Conselho Nacional da Indústria. Térmicas na base: a escolha inevitável. Propostas da Indústria Eleições 2018, v. 29, Brasília, 2018.

CRISP, D. *et al.* How well do we understand the land-ocean-atmosphere carbon cycle? *Reviews of Geophysics*, v. 60, e2021RG000736, 2022.

DONEY, S. C., *et al.* Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Climate change impacts on marine ecosystems. Annual Review of Marine Science*, v. 1, p. 169 – 192, jan., 2009.

DUTRA, J. C. C., *et al.* Simulação da dispersão de poluentes emitidos por uma usina termelétrica de 532 mW médios, localizada no nordeste brasileiro. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, VII., 2012, São Luís. Anais. São Luís, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2012.

EPSTEIN, M. Impacto ambiental das emissões aéreas de usinas termelétricas: emissões de SO₂. *Revista Brasileira de Energia*, v. 1, n. 2, p. 19-27, 1990.

EPA U.S. – *United States Environmental Protection Agency.* AERMOD: description of model formulation. EPA, 2004.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. In: Ministério de Minas e Energia. Energia termelétrica: gás natural, biomassa, carvão, nuclear. Rio de Janeiro, 2016.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. In: Ministério de Minas e Energia. Considerações sobre a participação do gás natural na matriz energética no longo prazo. Rio de Janeiro, 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. In: Ministério de Minas e Energia. Plano nacional de energia 2050. Rio de Janeiro, 2020.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *In*: Ministério de Minas e Energia. Nota técnica: apoio à restauração florestal no Brasil pelas empresas de óleo e gás por meio de crédito de carbono. Rio de Janeiro, 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *In*: Ministério de Minas e Energia. Estudos do plano decenal de expansão de energia 2032: energia e meio ambiente. Rio de Janeiro, dez. 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *In*: Ministério de Minas e Energia. Balanço energético nacional: ano base 2022. Rio de Janeiro, 2023.

ELMI, A., *et al.* *Modeling gaseous emissions and dispersion of two major greenhouse gases from landfill sites in arid hot environment. Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, (12), p. 15424 – 15434, mar., 2021.

FARIAS, L. M., SELLITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. *Revista Liberato*, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01 – 16, jan./jun. 2011.

FRIEDLINGSTEIN, P., *et al.* *Global Carbon Budget 2022. Open Access Earth System Science Data*, 14, 4811 - 4900. p. 4814 – 4813, 2022.

GABRIEL, L. C. Geração termoelétrica no Brasil a partir da biomassa da cana-de-açúcar. *Revista do Clube Naval*, v. 1, n. 397, p. 12 – 17, jul., 2021.

GOLDEMBERG, J. Energia e Desenvolvimento. *Estudos Avançados*, v. 33, p. 7-15, 1998.

GOLDEMBERG, J., LUCON, O. Energias renováveis: um futuro. *Revista USP*, São Paulo, n. 72, p. 6 – 15, 2007.

GOLDEMBERG, J. Termoeletricidade e a energia no país. *In*: EITLER, Kitta; LINS, Vania (Org.). *Energia que Transforma: Textos: vol.3*. Rio de Janeiro: Fundação Roberto Marinho, 2012, cap. 10, p. 90 – 97.

GRANTZ, D. A., GARNER, J. H. B., JOHNSON, D. W. *Ecological effect of particulate matter. Environment International*, v. 29, (2-3), p. 213 – 239, jun., 2003.

GULIA, S., MITTAL, A., KHARE, M. *Quantitative evaluation of source interventions for urban air quality improvement – a case study of Delhi city. Atmospheric Pollution Research*, v. 9, n. 3, p. 577 – 583, mai., 2018.

GUZMÁN, N. G., DOMÍNGUEZ, J. S., ASSIS, J. T. Desenvolvimento de ferramentas para modelar a dispersão de contaminantes atmosféricos com dados públicos brasileiros usando o modelo AERMOD. *Revista Brasileira de Climatologia*, Dourados, v. 31, jul./dez., p. 909 – 925, 2022.

HAUGAN, P. M., DRANGE, H. *Effects of CO2 on the ocean environment. Energy Conservation and Management*, v. 37, n. 6-8, p. 1019 – 1022, 1996.

HEPPLE, Robert P. *Human Health and Ecological Effects of Carbon Dioxide Exposure*. In: THOMAS, David C. (org.). *Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations*. v. 2, 2005. p. 1143 - 1172.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contas econômicas ambientais da terra: contabilidade física Brasil 2000 / 2020. Contas Nacionais n° 88. Contas Econômicas Ambientais n° 7. Rio de Janeiro, 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção de cana-de-açúcar. 2024.

IEA - *International Energy Agency*. *Energy Statistics Data Browser*.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. O efeito estufa e o setor energético brasileiro. ISSN 1415-4765, Rio de Janeiro, 2000.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Transição energética e potencial de cooperação nos BRICS em energias renováveis e gás natural. Brasília, 2021.

IRENA – *International Renewable Energy Agency*. *Country Rankings*.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. Geração termelétrica e emissões atmosféricas: poluentes e sistemas de controle. São Paulo, nov., 2016.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. Crise hídrica, termelétricas e renováveis: considerações sobre o planejamento energético e seus impactos ambientais e climáticos. São Paulo, set., 2021.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas: geração de eletricidade, emissões e lista de empresas proprietárias das termelétricas a combustíveis fósseis e de serviço público do Sistema Interligado Nacional (ano-base 2020). São Paulo, jun., 2022a.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. 2º Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas: geração de eletricidade, emissões e lista de empresas proprietárias das termelétricas a combustíveis fósseis e de serviço público do Sistema Interligado Nacional (ano-base 2021). São Paulo, dez, 2022b.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. 3º Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas: geração de eletricidade, emissões e lista de empresas proprietárias das termelétricas a combustíveis fósseis e de serviço público do Sistema Interligado Nacional (ano-base 2022). São Paulo, out., 2023.

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*. *Climate Change 2023 Synthesis Report: Summary for Policymakers*. 2023.

IRANKUNDA, E., et al. *The comparison between in-situ monitored data and modelled results of nitrogen dioxide (NO₂): case-study, road networks of Kigali city, Rwanda*. *Heliyon*, v. 8, n. 12, e12390, dez., 2022.

JARVIS, Debbie J.; ADAMKIEWICZ, Gary; HEROUX, Marie-Eve; RAPP, Regula; KELLY, Frank J. Nitrogen dioxide. In: *World Health Organization. WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. 1. ed. Copenhagen, 2010, p. 201 – 248.

JOB, S. *et al.* *Effect of seagrass cover loss on seawater carbonate chemistry: Implications for the potential of seagrass meadows to mitigate ocean acidification. Regional Studies in Marine Science*, v. 6, 102816, 2023.

KAUFFMAN, J. B., *et al.* *Shrimp ponds lead to massive loss of soil carbon and greenhouse gas emissions in northeastern Brazilian mangroves. Ecology and Evolution*, v. 8, n. 11, p. 5530 – 5540, jun., 2018a.

KAUFFMAN, J. B., *et al.* *Carbon stocks of mangroves and salt marshes of the Amazon region, Brazil. Biology Letters*, v. 14, n. 9, p. 1 - 4, set., 2018b.

KIMURA, W. J., SANTOS, E. F. Custo marginal de abatimento de emissões de gases de efeito estufa na recuperação da pastagem. *Revista iPecege*, v. 2, n. 4, p. 9 – 23, out./dez., 2016.

KLEYPAS, J. A. *et al.* *Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. Science*, v. 284, n. 5411, p. 118 – 120, 1999.

KOSE, S., SEKBAN, D. M., OZKOK, M. *Determination of port-induced exhaust gas emission amounts and investigation of environmental impact by creating emission maps: Sample of Trabzon port. International Journal of Sustainable Transportation*, v. 16, (3), p. 258 – 268, jan., 2021.

LESTARI, P., *et al.* *Emissions and spatial distribution of air pollutants from anthropogenic sources in Jakarta. Atmospheric Pollution Research*, v. 13, n. 9, 101521, set., 2022.

LIMA, M. T. S., SOUZA, M. C. Discorrendo sobre o uso das termelétricas no Brasil. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 37, ed. especial, UFVJM, p. 17 – 23, 2014.

LLOYD, P. J. *The role of energy in development. Journal of Energy in Southern Africa*, 28(1), 54 - 62.

MACÊDO, M. F. M., RAMOS, A. L. D. *Vehicle atmospheric pollution evaluation using AERMOD model at avenue in a Brazilian capital city. Air Quality, Atmosphere & Health*, v. 13, p. 309 – 320, jan., 2020.

MAHCADO, K. S., *et al.* *Carbon footprint in the ethanol feedstocks cultivation – agricultural CO2 emission assessment. Agricultural Systems*, v. 157, p. 140 – 145, out., 2017.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono no solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, v. 28, n. 2, p. 329 – 334, 2005.

MARTITS, L. A., GARCIA, F. G., JÚNIOR, J. B. C. A. Concessões de termelétricas no Brasil: investir ou não? *Revista Brasileira de Casos de Ensino em Administração*, v. 2, n 2, p. 1 – 11, 2012.

MAPBIOMAS – Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. Descrição da legenda: coleção 8.

MENEGUELLO, L. A., CASTRO, M. C. A. A. O protocolo de Kyoto e a geração de energia elétrica pela biomassa da cana-de-açúcar como mecanismo de desenvolvimento limpo. *Revista Internacional de Desenvolvimento Local*, v. 8, n. 1, p. 33 – 43, mar., 2007.

MELO, E. C. S., ARAGÃO, M. R. S., CORREIA, M. F. Regimes do vento à superfície na área de Petrolina, submédio São Francisco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 3, p. 229 – 241, 2013.

MELO, J. R., LIMA, E. P., GIMENEZES, M. L. Estudo computacional das emissões e dispersões atmosféricas do processo Kraft de produção de celulose: avaliação da qualidade do ar. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 21, n. 2, p. 233 – 240, abr./jun., 2016.

MOHNEN, V. A. *The challenge of acid rain. Scientific American*, v. 259, n. 2, p. 30 – 38, ago., 1998.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global: uma visão crítica. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, p. 7 – 24, 2008.

MOUSAVI, S. S., *et al.* *An evaluation of CO, CO₂, and SO₂ emissions during continuous and non-continuous operation in a gas refinery using the AERMOD. Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, (40), p. 56996 – 57008, jun., 2021.

NAKAGAWA, L., COMARÚ, F. A., TRIGOSO, F. B. M. Estudo dos efeitos na qualidade do ar e na saúde humana do funcionamento de usinas termoelétricas em regiões intensamente urbanizadas: o caso da UTE Piratininga – SP. *Revista Brasileira de Energia*, Vol. 16, N°. 2, 2° Sem, p. 49 – 61, 2010.

NETO, M. M., SILVA, J. B. Estimativas dos estoques de carbono em ecossistema de manguezal no Brasil: uma revisão. *Geoambiente On-line*, Goiânia, n. 45, 203.

NUNES, L. S. E. S. Avaliação do impacto de emissões de fontes de poluentes atmosféricos sobre a qualidade do ar: estudo de caso no Porto de Suape-PE. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 180. 2017.

OLIVEIRA, M. P. B. Estudo da dispersão atmosférica e agressividade do meio em Maringá – PR por meio do modelo de dispersão AERMOD. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Centro de Tecnologia – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, p. 137, 2012.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F., *et al.* Caracterização do regime de vento no município de Seropédica, Rio de Janeiro (2001 – 2010). *Floresta e Ambiente*, 20(4), 447 – 459, 2013.

OPPENHEIMER, M., *et al.* 2019: *sea level rise and implications for low-lying islands, costs and communities. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a*

Changing Climate, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 321 – 445, 2019.

PENNEY, David; BENIGNUS, Vernon; KEPHALOPOULOS, Stylianos; KOTZIAS Dimitrios; KLEINMAN, Michael; VERRIER Agnes. *Carbon monoxide. In: World Health Organization. WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. 1. ed. Copenhagen, 2010, p. 55 – 89.

PERRY, S. G. *et al.* AERMOD: a dispersion model for industrial source applications. part II: model performance against 17 field study databases. *Journal of Applied Meteorology*, v. 44, p. 694 – 708, mai. 2005.

RETALLACK, G. J. *Impact of Past Global Warming on Biodiversity. Encyclopedia of Biodiversity*, v. 4, p. 1 – 9, 2007.

PITZ, I. W., *et al.* Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Rio do Sul – SC. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 577 – 583, 2013.

RANGEL, M. G. L., *et al.* Estudo da dispersão de poluentes provenientes da queima de cana-de-açúcar no interior do estado de Pernambuco, Brasil. *In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, VII., 2014, Uberlândia. Anais. Uberlândia, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2014.*

ROSA, A. F. M. Modelagem da concentração de dióxido de enxofre na região de Candiota-RS utilizando o modelo AERMOD. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Mereologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 97. 2012.

ROSENDO, J. S., ROSA, R. Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de cerrado. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, MG, v. 24, n. 2, p. 359 – 376, mai./ago., 2012.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2022.

SOARES, L. H. B., *et al.* Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. *Circular Técnica*, Embrapa, Seropédica, RJ, p. 1 – 14, abr., 2009.

SCRAM – *Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling. Air Quality Dispersion Modeling: Preferred and Recommended Models*. 2023.

SILVA, M. C., *et al.* Direção predominante do vento para Recife e Caruaru – Pernambuco, Brasil. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, Curitiba, v. 21, n. 10, p. 17087 – 17112, 2023.

TAKAHASHI, T. *et al.* Climatological distributions of pH, pCO₂, total CO₂, alkalinity, and CaCO₃ saturation in the global surface ocean, and temporal changes at selected locations. *Marine Chemistry*, v. 164, p. 95 – 125, 2014.

TEIXEIRA, R. F. B. O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza - CE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 3, p, 282 – 291, 2008.

TORRES, F. T. P., MARTINS, L. A. Fatores que influenciam na concentração do material particulado inalável na cidade de Juiz de Fora (MG). *Caminhos de Geografia*, v. 4, (16), p. 23 – 36, out., 2005.

UNEP – *United Nations Environment Programme. Stockholm Declaration. United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm, 16 jun., 1972.*

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto protocol. Conference of the Parties, Kyoto, 1 – 10 dez. 1997.*

UN – *United Nations. Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change, Paris, 12 dez., 2015.*

VERLY, O. M., *et al. Atlantic Forest woody carbon stock estimation for different successional stages using Sentinel-2 data. Ecological Indicators*, v. 146, 109870, fev., 2023.

VILLANOVA, P. H., *et al. Carbon stock growth in a secondary Atlantic Forest. Revista Árvore*, 43(4), e430402, jun., 2019.

VILLELA, I. A. C., SILVEIRA, J. L. *Ecological efficiency in thermoelectric power plants. Applied Thermal Engineering*, v. 27, 5-6, p. 840 – 847, abr., 2007.

VITAL, M. H. F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO₂ e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p. 167 – 244, set. 2018.

YORO, K. O., DARAMOLA, M. O. *CO₂ emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. Advances in Carbon Capture*, p. 3 – 28. 2020.

ZANCHETA, M. N.; MELDONIAN, N. L.; POLI, D. C. R. Uma análise dos impactos ambientais da usina termelétrica Piratininga, em comparação aos gerados pela Usina Angra I. *In: International Nuclear Atlantic Conference; Encontro nacional de aplicações nucleares, 7th, ago. 28 - set. 2, 2005, Santos, SP. Anais...* São Paulo: ABEN, 2005.

APÊNDICE A - CONVERSÃO DE UNIDADES PARA EMISSÃO DE CO₂

A modelagem no AERMOD necessita que a taxa de emissão dos gases seja dada em g/s. Logo, a seguinte conversão de unidade foi realizada utilizando o dado de emissão de 7 mil toneladas de CO₂e da termoelétrica de interesse para o ano base de 2022 (IEMA, 2022):

$$\begin{aligned} \text{Taxa de emissão} &= \frac{\text{massa (g)}}{\text{tempo (s)}} = \frac{7 \times 10^3 \text{ t}}{365 \text{ dias}} \times \frac{1 \times 10^6 \text{ g}}{1 \text{ t}} \times \frac{1 \text{ dia}}{86.400 \text{ s}} = \\ &= 221,96 \text{ g/s} \end{aligned}$$

Considerando que a termoelétrica possui duas chaminés, o valor da taxa de emissão modelado para cada uma delas foi de 110,98 g/s.