

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

EDSON SOUZA DE DEUS

**ESTUDO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE FONTES
ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA**

FLORIANÓPOLIS

2025

EDSON SOUZA DE DEUS

**ESTUDO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE FONTES
ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA**

Dissertação apresentada ao
Mestrado Profissional em
Clima e Ambiente do Campus
Florianópolis do Instituto
Federal de Santa Catarina
para a obtenção do diploma de
Mestre em Clima e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Cássio
Aurélio Suski

FLORIANÓPOLIS

2025

CDD 551.6981
D486e

Deus, Edson Souza de
Estudo das emissões de gases de efeito estufa de fontes estacionárias e
móveis rodoviárias de Santa Catarina [DIS] / Edson Souza de Deus;
orientação de Cássio Aurélio Suski – Florianópolis, 2025.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Mudanças climáticas. 2. Fontes móveis rodoviárias. 3. Fontes
estacionárias. 4. Combustão. 5. Inventário. I. Suski, Cássio Aurélio. II.
Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues - CRB 14/1117



Folha de Aprovação

Aluno (a): *Edson Souza de Deus*

Título:	ESTUDO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DIRETAS DE COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA
----------------	---

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente

Dr(a). Cássio Aurélio Suski



Documento assinado digitalmente
CASSIO AURELIO SUSKI
Data: 11/08/2025 12:59:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador(a) / Presidente / IFSC / local – SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência
(☒) **Aprovado** (☐) **Reprovado**

Dr(a). Dirceu Luis Herdies



Documento assinado digitalmente
DIRCEU LUIS HERDIES
Data: 11/08/2025 13:11:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador(a) Interno / xxxxxxxx / local - SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência
(☒) **Aprovado** (☐) **Reprovado**

Dr(a). Mathias Alberto Schramm



Documento assinado digitalmente
MATHIAS ALBERTO SCHRAMM
Data: 11/08/2025 19:43:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador(a) Interno / xxxxxxxx / xxxxxxxxxxxx - SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência
(☒) **Aprovado** (☐) **Reprovado**

Dr(a). André Luiz dos Reis



Documento assinado digitalmente
ANDRE LUIZ DOS REIS
Data: 12/08/2025 17:01:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador(a) Externo / xxxxxxxx / xxxxxxxxxxxx - SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência
(☒) **Aprovado** (☐) **Reprovado**

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(X) unanimidade

Itajaí, 11 de agosto de 2025



A concretização desta dissertação é, em grande parte, fruto do apoio inestimável de pessoas que acreditaram em mim e me guiaram. Dedico-a, primeiramente, à minha querida esposa, Katy de Deus, cuja força, paciência e compreensão foram a luz nos momentos difíceis, inspirando-me a seguir em frente. Ao Professor Cássio Suski, expresso minha sincera admiração e agradecimento pela dedicação incansável, pela orientação exemplar e pelos ensinamentos que transcendem o universo acadêmico, moldando não apenas este trabalho, mas também meu percurso profissional.

AGRADECIMENTOS

A jornada que culminou na presente dissertação foi pavimentada por incontáveis momentos de apoio, incentivo e valiosas contribuições, pelos quais manifesto a mais profunda gratidão.

Primeiramente, elevo meus agradecimentos a Deus, pela força, resiliência e inspiração constantes que me permitiram superar os desafios e perseverar ao longo de todo este percurso acadêmico.

Ao meu orientador, Professor Cássio Aurélio Suski, minha eterna gratidão. Sua dedicação incansável, sua orientação exemplar e seus valiosos ensinamentos foram pilares essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, elevando sua qualidade e expandindo minha visão de pesquisa. Sou imensamente grato por sua paciência e por compartilhar seu vasto conhecimento.

Expresso minha profunda gratidão aos colegas, cujas contribuições foram essenciais para o êxito e a leveza desta jornada acadêmica. À Débora, cujo vasto conhecimento em GEE e apoio meticuloso nas etapas de emissões, concentrações e elaboração de mapas foram fundamentais. Ao André, pelas discussões aprofundadas e seu excepcional domínio do modelo WRF-Chem, além da valiosa amizade que tanto contribuiu. Ao Dirceu, por sua dedicada colaboração e pelos enriquecedores momentos de aprendizado compartilhados. E ao Mathias, pelo constante incentivo e pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos e experiências, demonstrando uma notável paciência em todos os momentos. A contribuição de cada um foi fundamental.

Estendo meus agradecimentos a todos os docentes do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) que, com sua paixão pelo ensino e dedicação, estiveram presentes ao longo desta jornada de aprendizado. Suas aulas, conselhos e o ambiente de excelência que proporcionaram foram cruciais para minha formação.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero reconhecimento.

“Onde a vida se estende,
as transformações não são mais lentas,
mas abruptas;
e a teia de interdependência,
antes intacta,
agora se mostra rompida.”

(Rachel Carson, 1962)

RESUMO

As ações antropogênicas vêm contribuindo significativamente para o aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE), mudanças climáticas extremas e, conseqüentemente, um aumento na temperatura global, em função da queima de combustíveis fósseis, resultando em emissões de Dióxido de Carbono (CO₂), Óxido Nitroso (N₂O), Perfluorocarbonos (PFC), Hidrofluorocarbonos (HFC), Metano (CH₄) e Hexafluoreto de Enxofre (SF₆). As combustões estacionárias e móveis rodoviárias exercem um impacto de extrema grandeza em Santa Catarina, sendo o estado conhecido por sua diversidade industrial e grande frota veicular. Este estudo, objetiva inventariar as emissões de GEE provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias de Santa Catarina e avaliar os impactos dessas emissões no contexto das mudanças da temperatura global. A metodologia adota como base a análise e quantificação das emissões de GEE provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias em Santa Catarina, abrangendo sua avaliação por meio de simulações quantitativas e qualitativas, bem como a estimativa de seus impactos no aquecimento global. Como resultados obtidos, estima-se no estado, no ano de 2022, uma emissão de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias de 20.367.486,64 tCO₂e, bem como, de fontes estacionárias de 4.298.122,84 tCO₂e. Como meio de mitigação, criou-se cenários alterando a proporção dos combustíveis fósseis e biocombustíveis para as fontes móveis rodoviárias, analisou-se os impactos correlacionado as concentrações de CO₂e (em ppm), com a redução da temperatura global no decorrer dos anos, culminando no ano 2050, por meio da equação de Ellis (2013), obtendo no cenário 4, com a utilização somente de biocombustíveis e considerando-se somente a redução gerada pelo estado, a temperatura global de 14,969954°C. A análise conjunta dos dados, provenientes da ferramenta GHG Protocol e da modelagem numérica das emissões antropogênicas e simulações geoespaciais das concentrações realizadas com o modelo WRF-Chem, confirma que a utilização de biocombustíveis promove uma redução nas emissões de GEE no estado de Santa Catarina. As projeções para 2050 indicam reduções significativas nas concentrações desses gases: aproximadamente 12,18% para os gases de efeito estufa em geral, 15% para o CO₂, 17% para o CH₄ e com redução do CO entre 6 e 8%, cuja diminuição é ainda mais pronunciada em áreas críticas. Tal constatação é fundamental para os esforços de mitigação do aquecimento global.

Palavras-Chave: Combustão, Fontes Móveis rodoviárias, Fontes Estacionárias, Inventário, Mudanças Climáticas, WRF-CHEM.

ABSTRACT

Anthropogenic actions have contributed significantly to the increase in greenhouse gases (GHG) concentrations, extreme climate change and, consequently, an increase in global temperature, due to the burning of fossil fuels, resulting in emissions of Carbon Dioxide (CO₂), Nitrous Oxide (N₂O), Perfluorocarbons (PFCs), Hydrofluorocarbons (HFCs), Methane (CH₄) and Sulfur Hexafluoride (SF₆). Stationary and mobile road combustions have an extremely large impact on Santa Catarina, the state being known for its industrial diversity and large vehicle fleet. This study aims to inventory GHG emissions from stationary and mobile road combustions in Santa Catarina and to assess the impacts of these emissions in the context of global temperature changes. The methodology is based on the analysis and quantification of the locations of GHG emissions from stationary and mobile road combustion sources in Santa Catarina; in the assessment of GHG emissions from stationary and mobile road combustions in Santa Catarina, through quantitative and qualitative simulations and; in the Estimation of the impacts of GHG emissions from stationary and mobile road combustions in Santa Catarina on global warming. As results obtained, it is estimated in the state, in 2022, GHG emissions from mobile road sources of 20,367,486.64 tCO_{2e}, as well as from stationary sources of 4,298,122.84 tCO_{2e}. As a means of mitigation, scenarios were created changing the proportion of fossil fuels and biofuels for road mobile sources, and the impacts were analyzed by correlating CO_{2e} concentrations (in ppm) with the reduction in global temperature over the years, culminating in the year 2050, using the Ellis equation (2013), obtaining in scenario 4, with the use of only biofuels and considering only the reduction generated by the state, a global temperature of 14.969954°C. The joint analysis of the data, from the GHG Protocol tool and the numerical modeling of anthropogenic emissions and geospatial simulations of the concentrations carried out with the WRF-Chem model, confirms that the use of biofuels promotes a reduction in GHG emissions in the state of Santa Catarina. Projections for 2050 indicate significant reductions in the concentrations of these gases: approximately 12.18% for greenhouse gases in general, 15% for CO₂, 17% for CH₄ and a reduction in CO of between 6 and 8%, the reduction of which is even more pronounced in critical areas. This finding is fundamental for efforts to mitigate global warming.

Keywords: Combustion, Mobile Road Sources, Stationary Sources, Inventory, Climate Change, WRF-CHEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva de Keeling e o blá-blá-blá da governança global: 1959-2022.....	20
Figura 2: Esquema dos processos químicos e de transporte relacionados à composição atmosférica.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 3: Mudança na temperatura de superfície global, relativa 1850 – 2000	34
Figura 4: Mapa do estado de Santa Catarina.....	41
Figura 5: Distribuição geográfica das indústrias (42.961 unidades) em Santa Catarina	44
Figura 6 – Distribuição geográfica das indústrias GPP (371 unidades) e Termelétrica em Santa Catarina.....	47
Figura 7: Concentração mensal dos GEE em Santa Catarina	48
Figura 8: Distribuição geográfica da Termelétrica em Santa Catarina.....	72
Figura 9: Projeções das emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, com a utilização de biocombustíveis	76
Figura 10: Distribuição espacial das emissões horárias de monóxido de carbono (CO) simuladas com o modelo WRF-Chem para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050 no estado de Santa Catarina, no dia 14 de julho de 2022.....	83
Figura 11: Distribuição espacial das emissões horárias de dióxido de carbono (CO ₂) simuladas com o modelo WRF-Chem para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050 no estado de Santa Catarina, no dia 14 de julho de 2022.....	85
Figura 12: Distribuição espacial das emissões horárias de metano (CH ₄) simuladas com o modelo WRF-Chem para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050 no estado de Santa Catarina, no dia 14 de julho de 2022	87
Figura 13: Distribuição espacial das concentrações horárias de monóxido de carbono (CO) simuladas com o modelo WRF-Chem no estado de Santa Catarina, para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050, no dia 14 de julho de 2022	89
Figura 14: Distribuição espacial das concentrações horárias de dióxido de carbono (CO ₂) simuladas com o modelo WRF-Chem no estado de Santa Catarina, para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050, no dia 14 de julho de 2022.....	91
Figura 15: Distribuição espacial das concentrações horárias de metano (CH ₄) simuladas com o modelo WRF-Chem para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050 no estado de Santa Catarina, no dia 14 de julho de 2022.....	92

Figura 16: Projeções da Concentração Atmosférica e Diferença Percentual de Monóxido de Carbono (CO) em Santa Catarina para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050	94
Figura 17: Projeções da Concentração Atmosférica e Diferença Percentual de Dióxido de Carbono (CO ₂) em Santa Catarina para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050	95
Figura 18: Projeções da Concentração Atmosférica e Diferença Percentual de Metano (CH ₄) em Santa Catarina para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050	97
Figura 19: Aplicativo “CO ₂ Consciente”, disponível publicamente.....	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Densidade veicular e industrial (GPP) de Santa Catarina.	42
Quadro 2: Quantificação da frota de automóveis no estado de Santa Catarina em 2022.	51
Quadro 3: Quantificação da frota de caminhões no estado de Santa Catarina em 2022	53
Quadro 4: Quantificação da frota de caminhonetes no estado de Santa Catarina em 2022.	54
Quadro 5: Quantificação da frota de motocicletas no estado de Santa Catarina em 2022	56
Quadro 6: Quantificação da frota de ônibus no estado de Santa Catarina em 2022.	57
Quadro 7: Projeção de cenários, alterando a proporção de combustíveis para fontes estacionárias.	58
Quadro 8: Simulação de cenários, alterando a proporção de combustíveis para fontes móveis rodoviárias.	59
Quadro 9: Fatores de emissões de CO ₂ dos combustíveis industriais.	64
Quadro 10: Emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, conforme cenário 1, ano 2022.	65
Quadro 11: Projeções das emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, conforme cenário 2, ano 2030.	72
Quadro 12: Projeções das emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, conforme cenário 3, ano 2040.	73
Quadro 13: Fatores de emissões de CO ₂ dos combustíveis rodoviários.	74
Quadro 14: Projeções das emissões estacionárias por indústrias de GPP em Santa Catarina, em tCO ₂ e, para os anos de 2030, 2040 e 2050 conforme cenários, considerando a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis.	75
Quadro 15: Projeções das emissões de GEE provenientes de fonte estacionária associada à usina termelétrica em Santa Catarina, expressas em tCO ₂ e, para os anos de 2030, 2040 e 2050, considerando cenários de substituição progressiva de combustível fóssil por biocombustível.	75
Quadro 16: Projeções das emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, conforme cenário 4, ano 2050.	75

Quadro 17: Inventário das emissões de Santa Catarina no ano de 2022, com utilização do Programa Brasileiro GHG Protocol.78

Quadro 18: Redução das emissões de CO₂e, conforme cenários pré-estabelecidos, alterando a proporção de combustíveis e biocombustíveis para fontes estacionárias e móveis rodoviárias79

Quadro 19: Estimativa dos impactos das reduções de emissões de GEE provenientes das combustões móveis rodoviárias de Santa Catarina, sobre o aquecimento global.80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Grau Centígrado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
B10	10% de biodiesel adicionado ao diesel
B100	Biocombustível composto por 100% de biodiesel
BEM	Balanço Energético Nacional
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CLT	Camada Limite Terrestre
CMAQ	Community Multiscale Air Quality Modeling System
CO	Óxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COAMPS	Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CTF/APP	Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras
DEFRA	Departamento de M. A., Alimentação e Assuntos Rurais do Reino Unido
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
DETRAN-SC	Departamento Estadual de Trânsito de Santa Catarina
E27	Mistura de gasolina com 27% de etanol anidro
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA
FGVces	Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Gases de Efeito Estufa
GPP	Grande Potencial Poluidor
GWP	Potencial de Aquecimento Global
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água

HC	Hidrocarbonetos
HFC	Hidroflurocarbonos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IMA	Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
JBN	Jato de Baixo Nível
km	Quilômetro
LIDAR	Sensor de Varredura a Laser
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MM5	Fifth-Generation Penn State
MPAS	Model for Prediction Across Scales
MtCO ₂ e	Milhões de Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente
N ₂ O	Óxido Nitroso
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
NCAR	Mesoscale Model
NDCs	Contribuições Nacionalmente Determinadas
NCDC	Centro Nacional de Dados Climáticos
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
NRL	Naval dos Estados Unidos
O ₃	Ozônio
OH	Hidroxila
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PFC	Perflurocarbonos
PM	Partículas em suspensão
PPB	Partes por bilhão
PPBV	Partes por bilhão por volume
PPM	Partes por milhão
PPMV	Partes por milhão por volume

PRONAR	Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar
QGIS	Software Quantum GIS
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SEESP	Sindicato dos Engenheiros no Estado de São Paulo
SENATRAM	Secretaria Nacional de Trânsito
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SINFAT	Sistema de Licenciamento Ambiental
SIRGAS	Sistema de Referência Geodésico Datum
SSP	Secretaria de Estado da Segurança Pública
TCO _{2e}	Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WHO	Organização Mundial da Saúde
WRF	Weather Research and Forecasting
WRF-CHEM	Weather Research and Forecasting with Chemistry
WRF-GHG	Weather Research and Forecasting model - Greenhouse Gases
WRI	World Resources Institute

LISTA DE SÍMBOLOS

+	Adição
°	Grau
ln	Logaritmo Natural
<	Maior que
>	Menor que
'	Minuto
%	Porcentagem
"	Segundo
-	Subtração
Δ	Variação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.1.1	Objetivo geral	24
1.1.2	Objetivos específicos	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE).....	27
2.1.1	Fontes antropogênicas de emissões de GEE	30
2.1.2	Fontes móveis rodoviárias.....	31
2.1.3	Fontes estacionárias	32
2.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	33
2.3	TECNOLOGIAS E PRÁTICAS DE MITIGAÇÃO DOS GEE.....	35
2.3.1	Modelagem de emissões de GEE	36
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS FONTES DE COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA.	42
3.1.1	Emissões de GEE provenientes das fontes de combustões estacionárias	42
3.1.2	Emissões de GEE provenientes das fontes de combustões móveis rodoviárias.....	49
3.1.3	Projeções de cenários de transição energética	58
3.1.3.1	Transição energética de fontes de combustões estacionárias.....	58
3.1.3.2	Transição energética de fontes de combustões móveis rodoviárias	59
3.1.3.3	Equivalência Energética entre Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis	60
3.2	AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES DE FONTES ESTACIONÁRIAS E FONTES MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA	61

3.2.1	Emissões de GEE provenientes das combustões de fontes estacionárias de GPP e Termelétrica	63
3.2.2	Emissões de GEE provenientes das combustões de fontes móveis rodoviárias.....	64
3.3	ESTIMATIVA DOS IMPACTOS DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA NO AQUECIMENTO GLOBAL..	66
3.4	ESTIMATIVA E MODELAGEM DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
4.1	ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA	70
4.1.1	Emissões de GEE diretas de fontes estacionárias	71
4.1.2	Emissões de GEE diretas de fontes móveis rodoviárias	73
4.2	AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA.....	77
4.3	ESTIMATIVA DOS IMPACTOS DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA NO AQUECIMENTO GLOBAL..	80
4.4	MODELAGEM E SIMULAÇÕES GEOESPACIAIS DAS CONCENTRAÇÕES DE GEE.....	82
5	PRODUTOS DESENVOLVIDOS.....	99
5.1	APLICATIVO CO ₂ CONSCIENTE.....	99
5.2	MAPAS DE CONCENTRAÇÕES DE GEE	100
5.3	MAPAS DE EMISSÕES DE GEE	101
5.4	PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS.....	101
5.5	SUBMISSÃO DE ARTIGO	101
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
7	REFERÊNCIAS	106
	APÊNDICE A	116
	ANEXO A126	

1 INTRODUÇÃO

A dicotomia historicamente estabelecida entre o ser humano e a natureza levou a séculos de exploração dos recursos naturais sem plena consciência dos impactos devastadores resultantes, o que equivale a um suicídio global. Agravando-se notadamente após a Revolução Industrial, a relação entre o homem e a natureza passou a ser encarada como uma mera troca dentro do sistema econômico dominante. Somente após a Segunda Guerra Mundial, observou-se a grave percepção de que a exploração desenfreada poderia ter sérias consequências para a sustentabilidade da vida no planeta Terra (Cunha; Guerra, 2010).

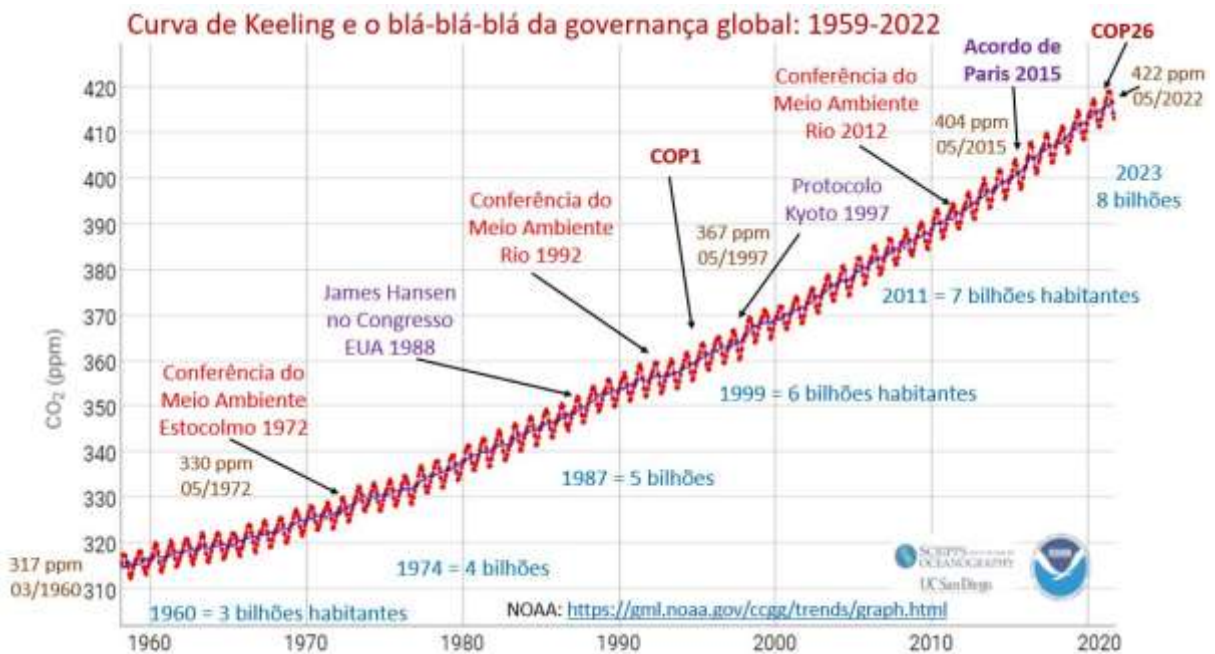
As atividades humanas, principalmente através das emissões de gases de efeito estufa (GEE), inequivocadamente causaram o aquecimento global, com contribuições históricas e contínuas, desiguais decorrentes do uso insustentável de energia, dos estilos de vida e dos padrões de consumo e produção, segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2023), as mudanças recentes têm origem antropogênica, devido, principalmente, às emissões de 22 gases de efeito estufa (GEE), onde os principais são, Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O), Perfluorocarbonos (PFC), Hidrofluorocarbonos (HFC) e Hexafluoreto de Enxofre (SF_6), que ocorrem nas atividades industriais, no desmatamento, na queima de combustíveis fósseis, entre outras atividades humanas (Melo; Sinfrônio, 2018).

De acordo com os cientistas do IPCC (2022), entre 1850 e 2019, os seres humanos liberaram cerca de 2.390 bilhões de toneladas de CO_2 na atmosfera, com a maior parte dessas emissões (entre 80% e 90%) originando-se da queima de combustíveis fósseis, como petróleo, gás e carvão mineral. Para conter o aquecimento global a 1,5 °C, a marca de emissões não deveria ultrapassar 2.900 bilhões de toneladas. Isso deixa um "saldo remanescente" de aproximadamente 400 a 500 bilhões de toneladas de CO_2 que podem ser emitidas nas próximas décadas. Contudo, no ritmo atual de 40 bilhões de toneladas emitidas anualmente, esse limite será ultrapassado até 2040, conforme destacado no relatório.

Segundo o IPCC (2022), esse aumento foi de 1,1°C em comparação com a temperatura média do período 1850-1900, que é usada como linha de base para representar a temperatura "normal" (natural) do planeta na era pré-industrial, antes da interferência humana. Segundo cientistas, a velocidade com que a Terra está se aquecendo nas últimas cinco décadas, é sem precedentes, nos últimos 2 mil anos, e

a última vez que o planeta experimentou temperaturas tão elevadas foi cerca de 125 mil anos atrás. Tudo isso impulsionado, principalmente, pelo aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, figura 1, que em 2022 atingiu 422 partes por milhão (ppm), a concentração mais alta nos últimos 2 milhões de anos (IPCC, 2022).

Figura 1 – Curva de Keeling e o blá-blá-blá da governança global: 1959-2022



Fonte: IPCC, 2022.

Para alcançar a meta estabelecida, é essencial uma redução de 45% nas emissões globais de carbono até 2030 em relação aos níveis de 2010 e o atingimento de zero emissões líquidas por volta da metade do século. O desafio reside na obtenção desses resultados, uma vez que as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) pactuadas pelos países não asseguram uma redução eficaz das emissões de GEE em comparação com 2010. Em vez disso, antecipa-se um incremento de 13,7% nas emissões de GEE até 2030 em relação aos níveis de 2010 (WRI BRASIL, 2021).

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), nos últimos anos, as preocupações relacionadas às mudanças climáticas e ao aquecimento global alcançaram um nível crítico de urgência em todo o mundo. A crescente concentração de GEE na atmosfera tem sido reconhecida como um dos principais impulsionadores dessas mudanças climáticas, com consequências potencialmente catastróficas para o planeta, trazendo devastação generalizada. Pela primeira vez, a entidade

quantificou o grau de influência das mudanças climáticas à frequência e à intensidade de eventos extremos, como secas prolongadas, ondas de calor, tempestades e furacões (ONU, 2023).

Seguindo este mesmo contexto, o estado de Santa Catarina, localizado no sul do Brasil, emerge como um ator significativo no cenário nacional e global em relação às emissões de GEE. Envolto em uma economia diversificada que inclui setores industriais, agrícolas e de transporte em constante expansão, Santa Catarina tem experimentado um aumento notável no consumo de combustíveis fósseis na atualidade. As combustões estacionárias e móveis rodoviárias de combustíveis fósseis, como derivados de petróleo e carvão, são fontes cruciais de emissões de GEE na região, que devem ser reduzidos para a contribuição global.

a) Justificativa:

A realização de um estudo das emissões de GEE diretas provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias em Santa Catarina se justifica por diversas razões críticas, as quais destacam a relevância e a urgência deste empreendimento de pesquisa.

As mudanças climáticas representam uma das maiores ameaças globais da atualidade. O aumento das concentrações de GEE na atmosfera é um dos principais impulsionadores desse fenômeno. Compreender o impacto e as contribuições de Santa Catarina para essas emissões é essencial para o entendimento das mudanças climáticas e suas possíveis mitigações em níveis regionais e globais.

O Brasil é signatário de acordos internacionais, como o Acordo de Paris, que estabelecem metas de redução das emissões de GEE. O estudo das emissões de Santa Catarina é crucial para verificar o progresso em relação a esses compromissos e identificar áreas onde esforços adicionais são necessários em resposta aos compromissos internacionais assumidos.

Compreender as fontes de emissões de GEE em Santa Catarina é fundamental para promover o desenvolvimento sustentável do estado. Isso envolve a redução das emissões de GEE em setores-chave com contribuições significativas nas emissões, bem como a promoção de fontes de energia mais limpas e a implementação de políticas de mitigação eficazes.

As mudanças climáticas têm impactos significativos nas comunidades locais, incluindo eventos climáticos extremos, alterações nos padrões de precipitação e aumento do nível de rios e mares. Ao estudar as emissões de GEE em Santa Catarina,

pode-se identificar áreas de maior vulnerabilidade e tomar medidas para proteger as populações locais.

O estudo das emissões de GEE fornece uma base sólida para o desenvolvimento de políticas públicas eficazes. Com dados precisos sobre as fontes de emissões, é possível criar estratégias de mitigação direcionadas e medidas de adaptação adequadas às necessidades específicas da região.

Investir em pesquisa sobre emissões de GEE estimula a inovação e o desenvolvimento de tecnologias mais limpas. Isso pode abrir oportunidades econômicas para o estado e promover a transição para uma economia de baixa emissão de carbono.

Em suma, o estudo das emissões de GEE provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias em Santa Catarina é de extrema importância para enfrentar um dos desafios mais prementes de nosso tempo, as mudanças climáticas. Ao compreender e abordar essas emissões de maneira eficaz, pode-se contribuir para a sustentabilidade ambiental, social e econômica de Santa Catarina e do planeta como um todo.

b) Definição do problema;

A problemática das emissões de GEE na atmosfera é uma questão crítica que afeta o equilíbrio climático do planeta. Os GEE, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e outros gases, são responsáveis por reter o calor na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global e mudanças climáticas adversas.

Os cientistas têm identificado limites de concentração admissíveis de GEE para evitar mudanças climáticas perigosas. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) sugere que para manter o aumento da temperatura global abaixo de $1,5^\circ\text{C}$ acima dos níveis pré-industriais, a concentração de CO_2 na atmosfera deve ser limitada a cerca de 350-400 partes por milhão (ppm).

De acordo com Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, alerta que atualmente, os níveis de concentração de GEE na atmosfera ultrapassam os limites admissíveis. Em 2022, a concentração de CO_2 atingiu aproximadamente 419 ppm, um nível significativamente superior ao considerado seguro pelos cientistas (CO2.EARTH, 2024; UNITED STATES, 2024). Além disso, a concentração de CH_4 aumentou para cerca de 1900 partes por bilhão (ppb), muito acima dos níveis pré-industriais de aproximadamente 722 ppb. De maneira similar, a concentração de N_2O

chegou a cerca de 334 ppb, comparada aos cerca de 270 ppb em tempos pré-industriais.

As concentrações elevadas de GEE na atmosfera têm várias consequências negativas, incluindo o aumento da temperatura média global (EEA, 2015). Em dezembro de 2022, a temperatura média global foi aproximadamente 0,86°C acima da média do século XX, contribuindo para o derretimento de geleiras e calotas polares, a elevação do nível do mar e alterações nos padrões climáticos.

As concentrações elevadas de GEE na atmosfera não apenas ultrapassam os limites admissíveis, mas também desencadeiam uma série de impactos adversos. Isso inclui uma maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas, tempestades e inundações, que ameaçam a segurança e a infraestrutura das comunidades. Além disso, essas mudanças climáticas estão resultando em alterações significativas nos habitats naturais, colocando em risco a sobrevivência de várias espécies e causando impactos profundos nos ecossistemas, podendo levar a uma potencial extinção em massa da vida terrestre.

Impactos Socioeconômicos, tais como, prejuízos consideráveis à agricultura, escassez de água, aumento de doenças relacionadas ao clima e deslocamento de populações.

Estudos regionais, como aqueles voltados para as emissões de GEE em Santa Catarina, desempenham um papel essencial na compreensão das contribuições locais para a crise climática global. Essas análises permitem identificar as principais fontes emissoras, monitorar o progresso em relação aos compromissos internacionais assumidos pelo país e orientar a formulação de políticas públicas e estratégias de mitigação alinhadas às particularidades e necessidades da região.

Conclui-se, portanto, que a problemática das emissões de GEE é tanto urgente quanto complexa, demandando ações articuladas em níveis global, nacional e regional. Somente por meio de esforços coordenados será possível reduzir as concentrações desses gases na atmosfera e mitigar os impactos das mudanças climáticas sobre os sistemas naturais e sociais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 **Objetivo geral**

Realizar o inventário das emissões de GEE provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias de Santa Catarina.

1.1.2 **Objetivos específicos**

- Analisar e quantificar os locais das emissões de GEE provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias de Santa Catarina;
- Avaliar as emissões de GEE provenientes das combustões estacionária e móveis rodoviárias de Santa Catarina, por meio de simulações quantitativas e qualitativas;
- Estimar os impactos das emissões de GEE provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias de Santa Catarina no aquecimento global.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente, o planeta Terra era uma esfera incandescente, com temperaturas em torno de 1.500°C , desprovida de qualquer forma de vida, em função das características da atmosfera primitiva. Ao longo de milhões de anos após sua formação, o planeta iniciou um processo gradual de resfriamento, acompanhado pelo escape de gases e vapores. Supostamente, a atmosfera primitiva do planeta Terra consistia de uma mistura de gases, tais como, o dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2) e vapor de água (H_2O), com vestígios de hidrogênio (H_2), semelhante as emitidas por vulcões na atualidade, porém a troposfera se comporta como um reservatório químico, com elevadas concentrações de vapor de água (Seinfeld; Pandis, 2016).

Para que o planeta se tornasse habitável, foi preciso um processo lento e progressivo de mudanças ambientais, na flora e na fauna, culminando no desenvolvimento das condições climáticas propícias à nossa espécie, o que possibilitou o surgimento do ser humano (Rockström *et al.*, 2009).

Contudo, à medida que as primeiras aldeias surgiram, logo deram lugar a centros urbanos e, por fim, a grandes metrópoles, o processo de industrialização expandiu consideravelmente, tornando a relação com o meio ambiente quase insustentável. A exploração descontrolada dos recursos naturais, suas transformações em bens de consumo e, conseqüentemente, a geração excessiva de resíduos, efluentes e grandes emissões de GEE atmosféricos, vem alterando o planeta de forma irreversível (Mariano *et al.*, 2011).

A atmosfera terrestre está envolta por uma camada de mistura de gases que atua como um cobertor, retendo a dissipação do calor da radiação solar. Durante o período de 1951 a 1980, a temperatura média global do ar à superfície foi de 14°C , a presença desse “cobertor” é crucial, pois entre tantos outros efeitos, é responsável por manter a temperatura do planeta, e a água em estado líquido. Sem ele, a temperatura calculada seria de -18°C , como evidenciado pela superfície lunar, desprovida de atmosfera. O fenômeno conhecido como efeito estufa é benéfico, pois mantém condições confortáveis e viáveis para a vida na Terra, contanto que as concentrações permaneçam dentro dos limites adequados (NASA Goddard Institute for Space Studies, 2023).

Estêvez (2016), destaca que a atmosfera terrestre desempenha várias funções essenciais, incluindo a proteção da superfície da Terra e dos organismos vivos contra

radiações nocivas, a manutenção do balanço térmico, o transporte de água dos oceanos para os continentes e a acumulação de gases.

No entanto, a partir desse ponto, grandes quantidades de carvão mineral e óleo combustível começaram a ser utilizadas indiscriminadamente como fontes de energia. Como resultado, a atmosfera dos centros industriais tornou-se insalubre e perigosa para a saúde (Cruz; D'avila, 2013).

Nas últimas décadas, houve um aumento considerável da temperatura média em diferentes regiões do planeta. A temperatura combinada da superfície terrestre e dos oceanos aumentou 0,85°C no período de 1880 a 2012. Esse aumento não foi homogêneo, com algumas localidades registrando um acréscimo de até 2,5°C. É altamente provável que mais da metade do aumento observado na temperatura média global da superfície entre 1951 e 2010 tenha sido causado pelo aumento antropogênico das concentrações de GEE (Toledo, 2019).

Diversos autores concordam que as atividades humanas foram responsáveis por um aumento de aproximadamente 1,1°C na temperatura média global em comparação aos níveis pré-industriais, com projeções indicando que esse valor poderá atingir cerca de 1,5°C entre 2030 e 2052 (Masson-Delmontte *et al.*, 2018; Allen *et al.*, 2018).

Atualmente, o aumento das concentrações de GEE na atmosfera perturba o ciclo natural do carbono nos ecossistemas originais, resultando em um acúmulo crescente desses gases. Esses gases aumentam a absorção de radiação de ondas curtas emitidas pela Terra, intensificando o aquecimento da superfície e agravando o fenômeno do aquecimento global (Oda; Maksyutov, 2011).

As concentrações de GEE estão intimamente ligados aos diferentes fenômenos e variáveis meteorológicas (Pérez *et al.*, 2020). A dinâmica da poluição do ar é significativamente influenciada pela radiação solar incidente, bem como pelos movimentos horizontal e vertical das massas de ar (Cavalcanti *et al.*, 2009). Cada uma das variáveis meteorológicas, como velocidade do vento, altura da camada limite, temperatura, umidade e precipitação, exerce influência sobre a dinâmica atmosférica, afetando a dispersão ou estagnação dos poluentes atmosféricos (Vallero, 2014).

Os desastres naturais têm sido uma repetitiva realidade nas cidades catarinenses, com perdas humanas, danos materiais significativos e prejuízos econômicos milionários (Bertoli; Suski, 2025).

A gestão do meio ambiente urbano representa um grande desafio: preservar os recursos ambientais e também assegurar condições de vida digna à população atual e para as futuras gerações (Mader, 2019).

2.1 GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

A dinâmica climática da Terra é intrinsecamente ligada à interação da radiação solar com a atmosfera e a superfície terrestre. Aproximadamente 70% da radiação visível solar atravessa a atmosfera, enquanto os 30% restantes são refletidos, um fenômeno que contribui para o albedo planetário (Zhao *et al.*, 2019). A energia absorvida aquece a superfície, que, por sua vez, emite radiação infravermelha em direção ao espaço. Contudo, uma parcela significativa dessa radiação é absorvida por GEE, que a reemitem em diversas direções. Esse processo resulta no retorno de uma fração dessa radiação à superfície e à baixa atmosfera, enquanto o restante se dissipa no espaço (SENAI, 2017).

Apesar de representarem uma pequena fração da composição atmosférica, cerca de 0,04%, o dióxido de carbono (CO_2) desempenha um papel crucial como regulador do clima terrestre, atuando como um "termostato" para a atmosfera. Variações mínimas em sua concentração podem desencadear alterações consideráveis na temperatura global. Essa dinâmica se estabelece devido ao fato de que os principais constituintes atmosféricos, nitrogênio e oxigênio, não possuem a capacidade de absorver a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre (Ellis *et al.*, 2013).

Os GEE, embora permitam a passagem da energia solar, retêm uma parcela considerável do calor através da absorção e reemissão da radiação infravermelha refletida pela superfície terrestre (SENAI, 2017). Esse fenômeno natural é essencial para manter a temperatura média do planeta em níveis habitáveis. No entanto, o aumento da concentração desses gases na atmosfera está elevando a "espessura" dessa camada, intensificando a retenção de calor e, conseqüentemente, elevando a temperatura média global (Melo; Sinfrônio, 2018).

Constata-se que a atmosfera terrestre é um sistema dinâmico e complexo, influenciado por uma miríade de fontes de emissão de substâncias, tanto de origem natural quanto antropogênica (Figura 2). Observa-se que as atividades desenvolvidas na superfície do planeta desempenham um papel significativo na liberação dessas

substâncias. Em áreas urbanas e industriais, verifica-se uma concentração de emissões que englobam diversos gases e partículas, resultantes de processos industriais, geração de energia e atividades urbanas, incluindo o transporte. A prática da agricultura, notadamente a criação de gado, é identificada como uma fonte relevante de certos gases. Adicionalmente, a queima de biomassa, seja por causas naturais ou pela ação humana, contribui para a emissão de poluentes e gases com potencial de efeito estufa. Em regiões áridas, o levantamento de poeira do deserto representa uma fonte de aerossóis atmosféricos. Os oceanos, por sua vez, emitem compostos de enxofre e participam do ciclo da água através da evaporação e convecção, influenciando a composição atmosférica. Ecossistemas terrestres, como florestas, também liberam naturalmente diversos compostos (NCDC, 2024).

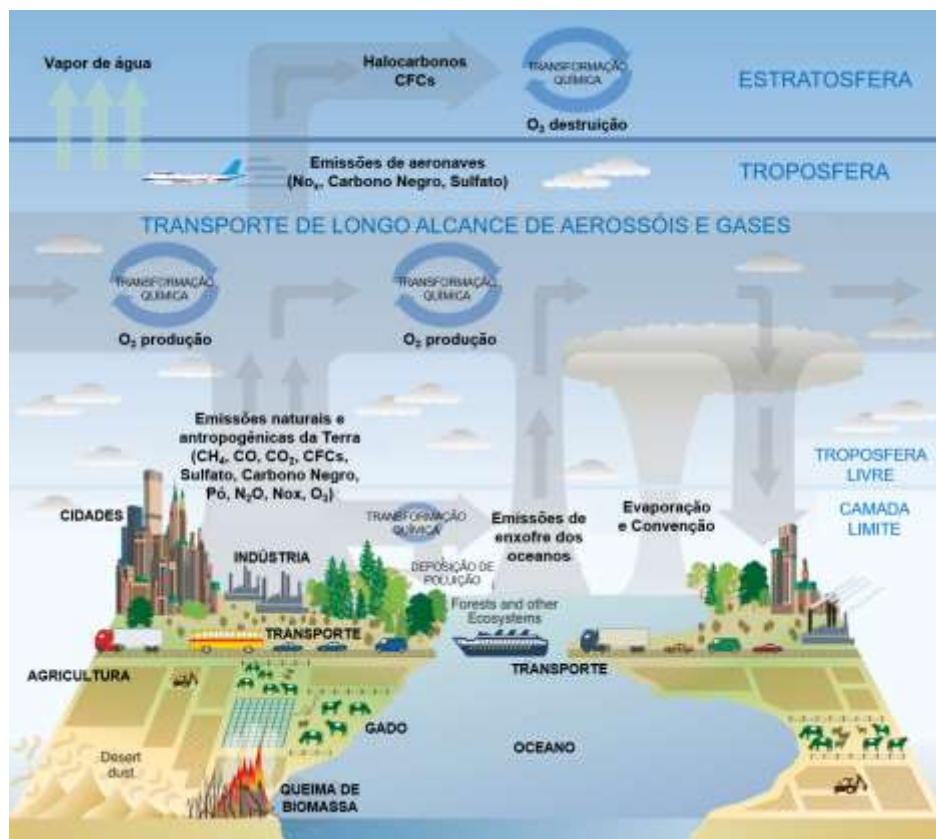
A atmosfera terrestre é estratificada em diferentes camadas, sendo as mais relevantes para a química atmosférica a troposfera e a estratosfera. A troposfera, camada mais próxima da superfície (estendendo-se até cerca de 10 a 15 km de altitude), abriga a maior parte da massa atmosférica e é o local onde ocorrem os principais fenômenos meteorológicos e as emissões antrópicas. Nesta região, os processos químicos são fortemente influenciados pela presença de óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (VOCs), monóxido de carbono (CO) e o radical hidroxila (OH), que atua como o principal “agente de limpeza” da atmosfera (Jacob, 2024).

No que concerne à troposfera, a camada atmosférica mais próxima da superfície, identifica-se que as substâncias emitidas estão sujeitas a um transporte de longo alcance, impulsionado pela circulação atmosférica (Figura 2). Processos de transformação química ocorrem no interior dessa camada, alterando a composição das substâncias presentes, reações fotoquímicas induzidas pela radiação solar na troposfera resultam na formação de ozônio troposférico (O_3). O vapor de água, originário da evaporação e convecção, é transportado verticalmente. Esse processo, embora natural, é intensificado por atividades humanas, sobretudo em áreas urbanas e industriais. Emissões diretas de aeronaves também contribuem para a composição da troposfera superior. Constata-se, ainda, a ocorrência da deposição de poluentes da atmosfera de volta à superfície. A troposfera apresenta uma estrutura vertical diferenciada, com a camada limite influenciada diretamente pela superfície e a troposfera livre acima desta (NCDC, 2024; Shindell, 2010).

Em relação à estratosfera, camada superior à troposfera, verifica-se que certas substâncias conseguem alcançar essa altitude. Halocarbonos, como os CFCs, de origem antropogênica, são transportados para essa região. Na estratosfera, esses compostos passam por reações químicas que levam à destruição da camada de ozônio. O vapor de água também pode atingir a estratosfera, participando de processos radiativos e químicos (NOAA,2023).

Em suma, depreende-se que a dinâmica atmosférica é regida por uma complexa interação entre as fontes de emissão na superfície e os processos de transporte e transformação que ocorrem em diferentes camadas da atmosfera. As emissões originadas de diversas atividades terrestres podem ter implicações em variadas escalas espaciais e em diferentes altitudes, afetando a qualidade do ar, o sistema climático e a integridade da camada de ozônio. Evidencia-se, portanto, a interconexão dos sistemas terrestres e atmosféricos e a necessidade de uma compreensão aprofundada dos ciclos biogeoquímicos e dos processos de transporte para a avaliação e mitigação dos impactos das atividades humanas no ambiente (Jacob, 2024).

Figura 2 – Esquema dos processos químicos e de transporte relacionados à composição atmosférica.



Fonte: Strategic Plan of the US Climate Change Science Program, 2023.

Segundo SEEG (2023), a análise das emissões de GEE e suas implicações para as metas climáticas do Brasil, no setor de energia, a alta das emissões também foi de 12,5%, o maior salto em 50 anos. Foram emitidas 435 milhões de toneladas em 2021, contra 387 milhões em 2020. A alta se deve à retomada da economia no pós-Covid, mas também a uma seca extrema que prejudicou a geração das hidrelétricas e a uma queda no uso de etanol. O setor de processos industriais e uso de produtos também registrou alta, de 155,4 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e) em 2020 para 169,9 MtCO₂e em 2021.

Entender as emissões e quantificá-las com precisão é a primeira questão que precisa ser enfrentada para realizar ações para reduzi-las, assim como para pensar planos de ação climática e de adaptação (Klaaben *et al.*, 2021; CNM, 2021). As emissões podem ser definidas como a quantidade de GEE, expressa em termos de CO₂ equivalente (CO₂e), que são emitidos direta e indiretamente na atmosfera por um indivíduo, organização, empresa, indústria, processo, produto (incluindo bens e serviços) ou evento, dentro de um limite específico (Pandey, 2011).

2.1.1 Fontes antropogênicas de emissões de GEE

As emissões antropogênicas são gases e partículas liberadas na atmosfera como resultado das atividades humanas, em contraste com as emissões naturais que ocorrem sem intervenção humana. Essas emissões representam os principais fatores que intensificam o efeito estufa e impulsionam as mudanças climáticas em escala global. As fontes antropogênicas mais relevantes incluem a queima de combustíveis fósseis (como carvão, petróleo e gás natural, resultantes dos processos industriais, do setor de transportes), o desmatamento, as práticas agrícolas e as atividades relacionadas ao manejo de resíduos.

Desde a Revolução Industrial, as atividades humanas têm sido as principais responsáveis pelo aumento significativo das emissões de GEE (EPA, 2021). Nesse período, os níveis atmosféricos de dióxido de carbono (CO₂) cresceram aproximadamente 47%, sendo as emissões antropogênicas apontadas como uma das principais causas desse expressivo incremento (Friedlingstein *et al.*, 2019).

Fontes estacionárias e móveis rodoviárias produzem uma grande quantidade de GEE na atmosfera, portanto, quantificar as emissões de CO₂ de fontes estacionárias e móveis rodoviárias é o primeiro e crítico passo na avaliação do

desempenho destes processos (Wolff *et al.*, 2021). Recentemente, concentrações de CO₂ obtidas por um LIDAR (Light Detection and Ranging), uma tecnologia de detecção e medição que usa luz na forma de um laser pulsado de absorção diferencial (Wang *et al.*, 2014), foram utilizadas para produzir uma estimativa muito precisa das emissões de CO₂ das fontes estacionárias e móveis rodoviárias (Mikhaylov *et al.*, 2020).

2.1.2 Fontes móveis rodoviárias

Fontes móveis rodoviárias referem-se a qualquer tipo de veículo ou equipamento que se move e que libera poluentes no ar como resultado da combustão interna de combustíveis fósseis ou de outros processos. Essas fontes móveis rodoviárias incluem veículos automotores (carros, caminhões, ônibus, motocicletas), embarcações, aeronaves e equipamentos rodoviários, utilizados na construção e na agricultura. Essas fontes são uma contribuição significativa no contexto da poluição do ar, particularmente em áreas urbanas e suburbanas, utilizando principalmente gasolina, diesel, gás natural e querosene, entre outros (Who, 2018).

As fontes móveis rodoviárias, especialmente os veículos automotores, emitem uma variedade de poluentes atmosféricos durante a queima de combustíveis fósseis, incluindo dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC) e partículas em suspensão (PM). Essas emissões contribuem significativamente para a degradação da qualidade do ar (EPA, 2021).

Para enfrentar esses desafios, diversas tecnologias de controle de emissões foram desenvolvidas e implementadas ao longo das últimas décadas. Isso inclui avanços significativos em motores mais eficientes, sistemas de controle de emissões como catalisadores e filtros de partículas, e o incentivo ao uso de combustíveis mais limpos, como biocombustíveis e eletrificação dos transportes. Além disso, regulamentações rigorosas são essenciais para garantir que os veículos novos atendam a padrões ambientais cada vez mais exigentes (EPA, 2021).

Em 2022, o estado de Santa Catarina destacou-se nacionalmente com uma média de 0,75 veículos por habitante, liderando o ranking de frota de veículos rodoviários per capita, à frente do Paraná (0,69 veículos por habitante) e de São Paulo (0,65 veículos por habitante). Esse elevado índice de veículos por habitante evidencia

a crescente dependência da população catarinense do transporte individual. Além disso, Santa Catarina figura entre os três estados com a maior densidade de veículos por quilômetro quadrado, o que reflete tanto a infraestrutura rodoviária quanto os desafios de gestão do tráfego e da poluição no estado (IBGE, 2022).

As emissões de veículos automotores incluem poluentes provenientes de várias fontes, como os gases de exaustão, emissões evaporativas, desgaste físico de pneus, freios e pavimento, além da ressuspensão de partículas do solo e do processo de abastecimento de combustível. Estas emissões contribuem significativamente para a poluição do ar, impactando a saúde pública e o meio ambiente, exacerbando problemas como a mudança climática e a poluição urbana (EPA, 2021; Who, 2018; INMETRO, 2022).

2.1.3 Fontes estacionárias

Fontes estacionárias são definidas como fontes estacionárias de emissão de poluentes que operam em locais específicos e permanentes. Essas fontes emitem poluentes diretamente para a atmosfera através de chaminés, dutos ou outros sistemas de ventilação. As principais emissões de fontes estacionárias incluem dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), partículas (material particulado), compostos orgânicos voláteis (COVs) e metais pesados.

A EPA (2021) conceitua, fontes estacionárias de poluição atmosférica como sendo:

Qualquer fonte estacionária de poluição do ar, incluindo fábricas, refinarias, caldeiras, centrais elétricas, incineradores, instalações industriais ou equipamento que emita ou tenha o potencial de emitir qualquer poluente atmosférico.

Embora a industrialização proporcione benefícios econômicos significativos para a humanidade, ela também é uma grande emissora de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Esses gases intensificam o efeito estufa global, resultando em mudanças climáticas, aumento do nível do mar e uma série de outros problemas ambientais e sociais (Rivera *et al.*, 2021).

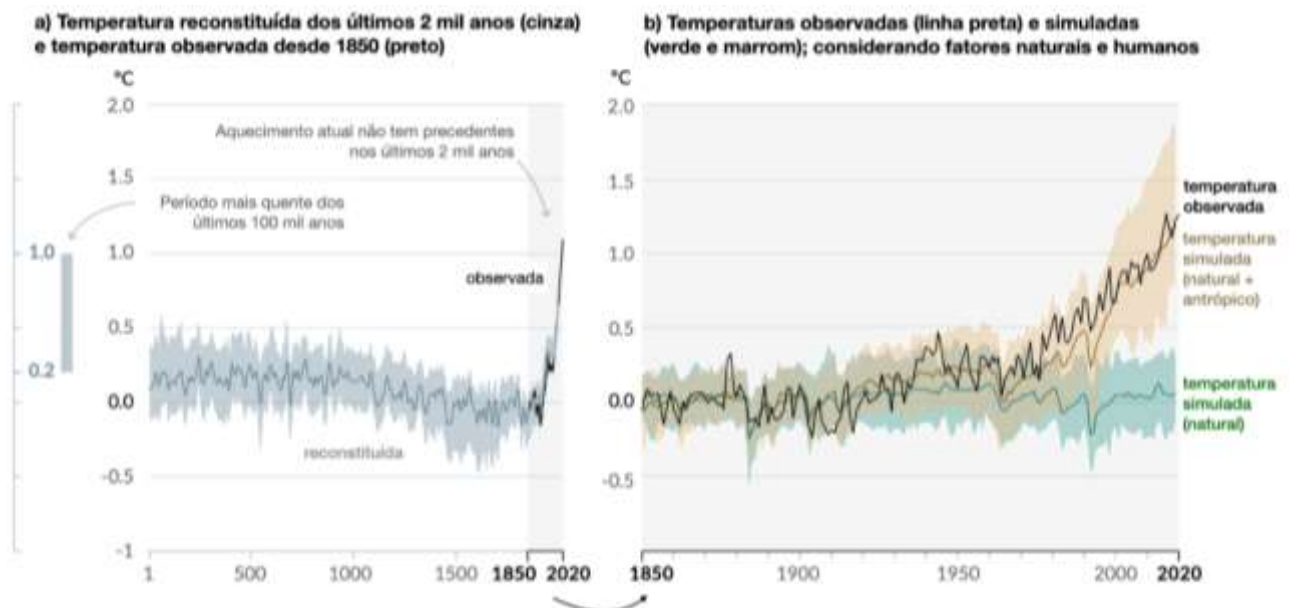
No Brasil, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nº 5, de 15 de junho de 1989 e a nº 382, de 26 de dezembro de 2006, regulamenta e estabelece os limites máximos das emissões de fontes estacionárias, conjuntamente com outras resoluções específicas que estabelecem padrões de qualidade do ar e limites de emissão para diversos poluentes, através do Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR), considerando a crescente industrialização de várias regiões do país com o consequente aumento do nível de emissões atmosféricas e a degradação da qualidade do ar.

2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Após a Revolução Industrial, no final do século XIX, a exploração dos recursos naturais atingiu níveis sem precedentes, marcando uma transição fundamental na história humana. Esse período, que se estende até os dias atuais, é conhecido como a era antropogênica, caracterizada pelo impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente, especialmente através da emissão de GEE. Com o aumento das atividades industriais e a queima de combustíveis fósseis, os níveis de CO₂ na atmosfera subiram significativamente, tornando-se o principal motor das mudanças climáticas globais (Liu *et al.*, 2022; IPCC, 2023). Essa fase histórica destaca-se como um marco, pois, pela primeira vez, as ações humanas começaram a superar os fatores naturais em sua influência sobre o clima.

Conforme o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021), a Figura 3 apresenta uma análise detalhada da evolução das temperaturas globais ao longo dos séculos. A análise revela que, embora variações naturais de temperatura tenham ocorrido ao longo da história da Terra, o aumento exponencial da temperatura global a partir da Revolução Industrial é inédito. Os dados indicam de forma clara e irrefutável que as atividades humanas, particularmente as emissões de GEE, são o fator principal por trás do aquecimento global observado nas últimas décadas. Essa constatação, fundamentada em análises científicas de grande rigor, evidencia que a mudança climática que estamos presenciando não é um fenômeno natural, mas sim uma consequência direta da ação humana.

Figura 3 – Mudança na temperatura de superfície global, relativa 1850 – 2000



Fonte: IPCC AR6 WGI / Jornal da USP (adaptado da versão em inglês), 2021

Rockström (2009) apresenta uma teoria sobre os limites planetários, destacando que existem nove fatores críticos para manter o equilíbrio ecológico da Terra. Entre esses fatores, as mudanças climáticas ocupam uma posição central, especialmente no que diz respeito à concentração de CO₂ atmosférico. O autor aponta que a concentração de CO₂ não deve ultrapassar 350 ppm, sendo 450 ppm, o limite superior considerado perigoso. Caso esses limites sejam ultrapassados, as condições para a manutenção da vida humana no planeta podem se tornar insustentáveis. Se as emissões de CO₂ dobrassem, e levando em consideração o derretimento das calotas polares e alterações na distribuição da vegetação, a temperatura global poderia aumentar até 6°C, o que representaria uma ameaça direta à sustentabilidade dos ecossistemas e à sobrevivência da humanidade.

O aquecimento global não se limita ao aumento das temperaturas; ele provoca uma série de alterações no ambiente, como o aquecimento das águas superficiais dos oceanos. Esse aquecimento contribui para o aumento da umidade do ar e altera a dinâmica atmosférica, afetando os padrões de vento e a pressão atmosférica (IUCN, 2016). As consequências das mudanças climáticas são globais e acumulativas, afetando não apenas o clima, mas também os ecossistemas, as economias e as comunidades humanas. Dada a complexidade e a gravidade do problema, torna-se

urgente uma ação coordenada e eficaz em nível global para mitigar seus impactos (Souza; Corazza, 2017).

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC (2023) apresenta uma análise detalhada sobre os efeitos devastadores do aumento das emissões de GEE em todo o mundo. A partir de um trabalho científico coletivo de oito anos, envolvendo mais de 700 cientistas, o relatório fornece a mais precisa e abrangente avaliação das mudanças climáticas até o momento. O IPCC alerta que, se as atuais tendências de emissões não forem alteradas, a temperatura global aumentará em até 1,5°C nas próximas décadas, o que provocará o derretimento de geleiras, o aumento do nível do mar, ondas de calor extremo, alterações no regime de precipitação e a destruição de comunidades, além de outros impactos severos. Esses efeitos são irreversíveis, a menos que medidas drásticas sejam adotadas rapidamente para mitigar os danos e preservar a viabilidade do nosso planeta (IPCC, 2022; IPCC, 2023; HU *et al*, 2020; Mohammed *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2014).

2.3 TECNOLOGIAS E PRÁTICAS DE MITIGAÇÃO DOS GEE

Conforme o relatório do IPCC (2023), sobre o controle das emissões de GEE, há esperança significativas na mitigação das mudanças climáticas, apontando estratégias específicas para evitar esses riscos, tais como a transição para fontes de energia renovável e a implementação de práticas sustentáveis, como a utilização de energias renováveis (biocombustíveis, solar, eólica, hidrelétricas), eficiência energética, mudança no estilo de vida e consumo sustentável. O documento identifica ações já disponíveis e, em alguns casos, consideravelmente econômicas, que podem reduzir as emissões de GEE, aumentar a remoção de carbono e construir resiliência. Embora a janela para enfrentar a crise climática esteja fechando rapidamente, o IPCC (2023) afirma que ainda se tem chance de garantir um futuro seguro e habitável.

O Acordo de Paris representou um marco crucial no reconhecimento global das mudanças climáticas. Ao endossar o objetivo estabelecido pelo IPCC de limitar o aumento da temperatura a 2 °C em relação à era pré-industrial, os 195 países signatários reafirmaram seu compromisso com a transição para uma economia global de baixo carbono (Milanez *et al.*, 2017).

Nesse contexto de compromissos internacionais voltados à mitigação das emissões de GEE, torna-se essencial dispor de ferramentas eficazes para

mensuração e controle dessas emissões. É nesse cenário que se insere o Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), programa desenvolvido nos Estados Unidos durante os anos 1990 com a colaboração de órgãos governamentais, entidades não governamentais e acadêmicos, sob a coordenação do World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) e do World Resources Institute (WRI, 2021). O protocolo surgiu da necessidade de padronizar internacionalmente a quantificação e o relato das emissões de GEE, oferecendo às organizações um método estruturado para gerenciar suas emissões. Atualmente, o GHG Protocol é amplamente reconhecido como a principal metodologia adotada por empresas e governos para a elaboração de inventários de gases de efeito estufa, sendo compatível com as normas ISO e com as diretrizes do próprio IPCC (Melo; Sinfrônio, 2018).

2.3.1 Modelagem de emissões de GEE

A modelagem de emissões de GEE consiste na utilização de métodos científicos e computacionais para representar, estimar, simular e projetar, através de modelos matemáticos, a complexa dinâmica da quantidade de GEE liberada na atmosfera por uma variedade de fontes, sejam elas de origem natural ou antropogênica (IPCC, 2014). Observa-se que a modelagem assume papel fundamental na compreensão e na previsão de como distintos fatores interagem, influenciando os padrões de emissão de GEE e, conseqüentemente, seus impactos no sistema climático global.

A modelagem das emissões atmosféricas pode ser realizada por meio de diferentes abordagens, que variam em complexidade, escala espacial e temporal, bem como nos processos físico-químicos considerados. Entre os principais modelos numéricos utilizados em pesquisas científicas, destacam-se o WRF (Weather Research and Forecasting) em sua versão CHEM, que inclui aerossóis e química atmosférica, amplamente empregado na modelagem de transportes de poluentes e interações entre processos meteorológicos e químicos atmosféricos (Seinfeld; Pandis, 2016).

O modelo numérico WRF (Weather Research and Forecasting) tem se destacado em estudos atmosféricos pela capacidade de simular, com alta resolução espacial, processos meteorológicos, padrões de precipitação e temperatura, além do

transporte de poluentes. Sua flexibilidade permite a aplicação em diferentes escalas, desde simulações locais até regionais, com desempenho satisfatório em regiões de topografia complexa. Essas características evidenciam sua robustez e ampla aplicabilidade em sistemas de previsão climática regional, contribuindo significativamente para o planejamento ambiental, a gestão de recursos hídricos e a avaliação da qualidade do ar (Yu *et al.*, 2022).

Contudo, há outros modelos de destaque que competem ou complementam o WRF, tais como o MM5 (Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model), o COAMPS (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System), o MPAS (Model for Prediction Across Scales) e o CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System). Dentre os diversos modelos atmosféricos utilizados em simulações numéricas, o WRF (Weather Research and Forecasting) destaca-se como o mais amplamente empregado na pesquisa e na previsão operacional, devido à sua capacidade de representar com maior detalhamento os múltiplos processos físicos da atmosfera, além de contar com esquemas de parametrização robustos e amplamente configuráveis. Estudos demonstraram que o esquema ideal depende significativamente do tempo ou do estado climático e da escala de aplicação, não havendo um esquema que apresente melhor desempenho de forma geral (Jankov *et al.*, 2011).

2.3.1.1 Modelo numérico WRF (Weather Research and Forecasting)

O Weather Research and Forecasting Model (WRF) constitui um modelo de previsão numérica de última geração e uma ferramenta de simulação meteorológica tridimensional baseada na formulação euleriana, desenvolvido para atender tanto às demandas da pesquisa atmosférica quanto às necessidades operacionais de previsão do tempo. Com uma arquitetura modular e altamente configurável, o WRF permite a simulação de uma ampla gama de fenômenos atmosféricos, abrangendo diferentes escalas espaciais e temporais, desde eventos locais até processos de larga escala. Essa flexibilidade tem consolidado o modelo como uma ferramenta amplamente utilizada na comunidade científica para estudos meteorológicos, climáticos e ambientais. No contexto das mudanças climáticas e da qualidade do ar, o WRF possui configurações específicas, como o WRF-Chem, que integram a modelagem de GEE e processos químicos atmosféricos, permitindo análises mais abrangentes e acuradas

dos impactos ambientais relacionados às emissões e à dinâmica atmosférica (Skamarock *et al.*, 2008; Streets *et al.*, 2003).

O WRF-GHG é uma extensão do modelo WRF-Chem, projetada para simular o transporte e a dispersão de GEE na atmosfera. Nessa configuração, os GEE, como CO₂, CH₄ e CO, são tratados como traçadores passivos, o que significa que o modelo considera apenas processos de transporte e mistura atmosférica, sem incluir reações químicas ou mecanismos de remoção desses gases. Essa abordagem permite analisar como os GEE são distribuídos espacialmente e temporalmente devido às dinâmicas atmosféricas, fornecendo insights valiosos para estudos climáticos e ambientais (Seinfeld; Pandis, 2016).

Nesse contexto, destaca-se a versão WRF-GHG (Weather Research and Forecasting model with Greenhouse Gases), que representa uma extensão do modelo WRF tradicional. Essa versão permite rastrear emissões antropogênicas, biogênicas, incêndios, poeira e aerossóis marinhos em diferentes escalas temporais e espaciais, considerando os processos de transporte, mistura e remoção atmosférica desses compostos. O WRF-GHG foi desenvolvido para promover maior acurácia na quantificação das fontes e sumidouros de GEE, integrando dados de inventários, observações por satélite, medições de superfície e simulações meteorológicas em uma estrutura única em tempo real ou análises retrospectivas com alta resolução temporal e espacial. Sua aplicação tem sido fundamental no suporte técnico à formulação de políticas públicas de mitigação, ao permitir simulações de cenários futuros com base em diferentes perfis de emissão (Huang *et al.*, 2020; Krey *et al.*, 2018).

O WRF-GHG utiliza os campos meteorológicos simulados pelo WRF (vento, temperatura, umidade, etc.) para determinar o transporte dos GEE. A precisão da simulação dos GEE depende fortemente da acurácia da meteorologia simulada (Alves, 2016).

2.3.1.2 Modelo numérico MM5 (Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model)

O modelo numérico MM5 (Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model) foi amplamente utilizado durante décadas em estudos atmosféricos voltados à simulação de fenômenos em escala regional, especialmente em ambientes com

topografia complexa. Mesmo com o avanço de modelos mais recentes, como o WRF, a ferramenta MM5 ainda apresenta relevância científica em aplicações científicas, dada sua estabilidade, estrutura modular e sua utilidade em estudos que exigem alta resolução espacial e modelagem atmosférica, sobretudo em regiões com forte influência orográfica. (Horvath *et al.*, 2022).

2.3.1.3 Modelo numérico COAMPS (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System)

O modelo numérico COAMPS (Coupled Ocean–Atmosphere Mesoscale Prediction System) tem se consolidado como uma ferramenta robusta para a previsão acoplada atmosfera-oceano, apresentando notável desempenho em aplicações voltadas a regiões costeiras e eventos de alta energia, como ciclones tropicais. Desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa Naval dos Estados Unidos (NRL), o COAMPS incorpora recursos avançados de assimilação de dados e simulações por conjunto (ensemble), demonstrando elevada precisão na representação da trajetória e intensidade de sistemas meteorológicos complexos em ambientes com forte interação oceano-atmosfera. Tais características evidenciam sua relevância como instrumento de apoio à gestão de riscos climáticos e ao planejamento estratégico em áreas suscetíveis a eventos extremos (Komaromi *et al.*, 2021).

2.3.1.4 Modelo numérico MPAS (Model for Prediction Across Scales)

O Model for Prediction Across Scales (MPAS) é um modelo numérico atmosférico desenvolvido pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR) em parceria com o Los Alamos National Laboratory. Seu principal diferencial está no uso de uma grade não estruturada baseada em malha de icosaedro, que possibilita variar a resolução espacial em diferentes regiões do globo. Essa característica permite detalhar áreas de maior interesse, como regiões costeiras ou de intensa convecção, sem comprometer a representação global.

Flexível e escalável, o MPAS é aplicado tanto em previsões meteorológicas de curto prazo quanto em estudos climáticos de longo prazo. Além de representar fenômenos em múltiplas escalas, pode ser integrado a outros modelos, como os de

química atmosférica e de oceanos, tornando-se uma ferramenta robusta para a compreensão e previsão de processos atmosféricos complexos. (Ciais *et. al.*, 2013).

2.3.1.5 Modelo numérico CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System)

A modelagem numérica tem se consolidado como uma ferramenta fundamental na avaliação da qualidade do ar e no estudo das emissões atmosféricas, especialmente no contexto das mudanças climáticas e da gestão ambiental. Nesse sentido, modelos numéricos como o CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) têm sido amplamente utilizados para simulações geoespaciais de processos físico-químicos e de transporte de poluentes, com foco na compreensão da formação, transformação e dispersão de gases e partículas na atmosfera. O CMAQ é um modelo Euleriano tridimensional que integra dados meteorológicos, inventários de emissões e parâmetros físico-químicos para representar com elevado grau de detalhamento o comportamento de poluentes atmosféricos em múltiplas escalas espaciais (Byun; Schere, 2006).

Sua aplicação é particularmente relevante na estimativa das emissões e concentrações de GEE, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x), permitindo simular diferentes cenários de emissão e avaliar os impactos de políticas públicas ou mudanças no uso do solo. Além disso, o CMAQ incorpora módulos avançados de química atmosférica e deposição seca e úmida, sendo amplamente reconhecido por sua capacidade de representar com precisão os complexos processos atmosféricos que envolvem os GEE e seus precursores (Byun; Schere, 2006).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta pesquisa foi embasado, através das seguintes etapas para atingir os objetivos pré-estabelecidos: Análise e quantificação dos locais das emissões de GEE provenientes de fontes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias de Santa Catarina; Avaliação das emissões de GEE provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias de Santa Catarina, por meio de simulações quantitativas e qualitativas e estimativa dos impactos das emissões de GEE provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias de Santa Catarina no aquecimento global.

Delimita-se como área de estudo, o estado de Santa Catarina, uma das 27 unidades federativas do Brasil, situada entre os paralelos $25^{\circ}57'41''$ e $29^{\circ}23'55''$ ambos de latitude sul e entre os meridianos $48^{\circ}19'37''$ e $53^{\circ}50'00''$ ambos de longitude oeste (Figura 4). Abrangendo uma extensão territorial de 95.738 km², e a população de 7.609.601 habitantes, conforme censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).

Figura 4 – Mapa do estado de Santa Catarina



Fonte: IBGE, 2021.

O estado de Santa Catarina ocupa a primeira posição no cenário industrial brasileiro, liderando o ranking nacional em número de estabelecimentos industriais per capita, com aproximadamente sete indústrias por mil habitantes (IBGE, 2023). Dentre esses estabelecimentos, 692 são classificados como indústrias de Grande Potencial Poluidor (GPP), elevado potencial de emissão de GEE (Quadro 1), o que evidencia a importância do setor industrial como fonte significativa de emissões no estado. No que tange à frota veicular, Santa Catarina ocupa a sexta posição no ranking nacional, com um total de 5.706.196 veículos registrados, o que representa, em média, 0,75 veículo por habitante (SENATRAN, 2022).

Quadro 1 – Densidade veicular e industrial (GPP) de Santa Catarina.

População (habitantes)	Área (km ²)	Frota veicular (veículo)	Densidade veicular (veículo/km ²)	Veículo per capta (veículo/habitante)	Indústrias (GPP)	Densidade industrial (GPP) (indústria/mil km ²)
7.609.601	95.738	5.706.196	59,60	0,75	692	7,23

Fonte: IBGE, 2023.

3.1 ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS FONTES DE COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA.

3.1.1 Emissões de GEE provenientes das fontes de combustões estacionárias

Para estimar a quantidade de pontos de emissão provenientes de combustões estacionárias em Santa Catarina, foram consideradas diversas variáveis relevantes, como as características das mesorregiões, população, área territorial, número total de indústrias, densidade industrial, além dos tipos, localizações e potenciais poluidores das atividades industriais emissoras de gases de efeito estufa (GEE). Esses dados foram obtidos a partir de bancos de dados públicos, organizados por código de atividade, disponibilizados pelo Sistema de Licenciamento Ambiental (SINFAT, 2023), complementados com informações do Registro Público de Emissões.

3.1.1.1 Quantificação das fontes de combustões estacionárias de GPP

Com base nessas informações, foi elaborada uma listagem das indústrias registradas e sediadas no estado de Santa Catarina, totalizando 42.961 unidades (Figura 5). Para refinar a análise e focar nas indústrias de grande porte as quais possuem maior potencial emissor, utilizou-se o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras (CTF/APP). A partir dessa fonte oficial e confiável, foi possível identificar as unidades industriais ativas, classificadas com grau elevado de potencial poluidor, especialmente no que se refere às emissões atmosféricas que afetam a qualidade do ar na troposfera. Esse processo permitiu o georreferenciamento e categorização dos principais focos emissores de GEE por combustão estacionária no território catarinense.

Medrando, na definição das indústrias de grande porte com grande potencial de emissões encontradas no território de Santa Catarina, embasou-se na resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) nº 98/2017, que define as atividades sujeitas ao licenciamento ambiental e o potencial poluidor do ar, emitido pelo agrupamento de indústrias, sendo elas, tratamento e disposições de resíduos sólidos, produção de energia termelétrica, indústria do petróleo, indústria de transformação e processamento de compostos químicos, orgânicos e inorgânicos, indústria de comida e produtos agropecuários, indústria madeireira, indústria de produtos minerais e indústria metalúrgica, com a fruição de seus respectivos códigos listados.

4 – Indústria de transformação e processamento de compostos químicos

20.60.00 – Fabricação de tintas, esmaltes, lacas, vernizes, solventes e secantes;

20.70.10 – Recuperação e refino de solventes, óleos minerais, vegetais e animais;

12.10.00 – Fabricação de máquinas, aparelhos e peças com tratamento químico superficial, fundição;

13.10.00 – Fabricação de pilhas, baterias e acumuladores;

30.60.00 – Fabricação de carvão ativado e Cardiff;

30.60.10 – Fabricação de carvão vegetal;

47.83.03 – Terminal de produtos químicos;

20.30.00 – Fabricação de adubos, fertilizantes e corretivos de solo.

5 – Indústria de Comida e produtos agropecuários

26.94.00 – Fabricação de rações balanceadas e de alimentos preparados para animais;

20.70.00 – Produção de óleos, gorduras e ceras vegetais e animais, produtos de destilação da madeira;

6 – Indústria madeireira

17.11.00 – Fabricação de madeira e celulose.

7 – Indústria de produtos minerais

10.50.00 – Fabricação de cimento;

10.40.20 – Fabricação de material cerâmico esmaltado;

30.20.00 – Usinas de produção de concreto asfáltico;

00.10.00 – Lavra a céu aberto com desmonte por explosivo;

00.10.01 – Lavra a céu aberto com desmonte por explosivo, se mineral típico de emprego na construção civil, independente do seu uso;

8 – Indústria metalúrgica

14.30.00 – Fabricação ou montagem de veículos rodoviários, aeroviários e navais;

11.10.00 – Metalurgia dos metais não-ferrosos em formas primárias – incluso metais preciosos;

11.11.05 – Produção de canos e tubos de metais não-ferrosos, incluso ligas, com fusão e sem tratamento;

11.11.12 – Produção de fios e arames de metais e ligas de metais não-ferrosos, incluso condutores elétricos, com fusão;

11.00.10 – Produção de fundidos de ferros e aço em forno cubilot, com tratamento químico superficial;

11.10.09 - Produção de fundidos de ferros e aço em forno cubilot, sem tratamento químico superficial;

11.11.02 - Produção de laminados de metais e de ligas de metais não-ferrosos, placas, chapas, bobinas;

11.11.01 – Produção de ligas de metais não-ferrosos em formas primárias, incluso metais preciosos; (CONSEMA, 2017).

A partir da aplicação dos critérios de classificação previamente estabelecidos, foi realizada uma primeira etapa de segregação das unidades industriais localizadas no estado de Santa Catarina. Nessa fase, foram mantidas apenas as indústrias compatíveis com as codificações pertinentes ao escopo da pesquisa, totalizando 7.200 estabelecimentos. Essa delimitação inicial teve como propósito assegurar a representatividade do setor industrial catarinense, considerando as diversas atividades econômicas com potencial de causar impactos ambientais relevantes, sobretudo em termos de emissões atmosféricas.

Na sequência, foi conduzido um refinamento metodológico no processo de triagem, com foco na identificação das indústrias com maior potencial de emissão de poluentes atmosféricos diretamente na troposfera. Esse critério visou restringir a análise às fontes que contribuem de forma mais significativa para a poluição do ar, excluindo-se, portanto, empreendimentos cujos impactos ambientais concentram-se majoritariamente em outros meios, como o solo, os corpos hídricos ou relacionados à poluição térmica e sonora.

Para essa etapa, foram utilizados os parâmetros definidos na Resolução CONSEMA nº 98, de 2017, emitida pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina (CONSEMA), a qual estabelece diretrizes para a classificação do potencial poluidor das atividades industriais no estado. Com base nesse referencial técnico-normativo, foi possível identificar e isolar 1.398 indústrias consideradas de grande potencial emissor atmosférico, representando um subconjunto de elevado interesse para estudos voltados às emissões de GEE e à avaliação da qualidade do ar no contexto estadual.

A adoção dessa abordagem metodológica possibilitou a consolidação de uma base de dados sólida, representativa e alinhada aos objetivos da pesquisa, permitindo uma análise mais acurada dos impactos atmosféricos decorrentes das atividades industriais em Santa Catarina. Tal estrutura favorece a elaboração de diagnósticos ambientais mais precisos, fundamentais para subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação das emissões de GEE no estado. O processo foi aprimorado com o suporte do Sistema de Informações Ambientais (SinFAT), gerido pelo Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA), o qual centraliza dados de licenciamento ambiental em uma plataforma única, conforme as recomendações do Ministério Público de Santa Catarina e em consonância com as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981). A partir da consolidação e filtragem dessas informações, foi possível identificar um total de 692 unidades industriais classificadas como de grande potencial poluidor atmosférico, conjunto este que constitui inicialmente o universo amostral de interesse para o presente estudo.

No entanto, em uma etapa subsequente de refinamento da base de dados, verificou-se que 320 dessas indústrias utilizavam, como fonte primária de energia, exclusivamente a energia elétrica. Considerando que esse tipo de matriz energética, por não envolver processos de combustão direta no local da atividade industrial,

apresenta baixa ou nula contribuição para as emissões atmosféricas diretas de GEE, tais unidades foram desconsideradas nas etapas seguintes da análise. Essa exclusão visa preservar a consistência técnica do estudo, assegurando que os resultados reflitam com maior precisão os setores industriais efetivamente responsáveis por emissões significativas na atmosfera.

Essa medida visa assegurar a robustez metodológica do estudo, focando apenas nas fontes emissoras com impacto atmosférico significativo. Ao final desse processo de depuração, restaram 371 indústrias classificadas como de GPP atmosférico, figura 6 e uma usina termelétrica, figura 8, as quais constituem o universo amostral de análise deste trabalho.

Figura 6 – Distribuição geográfica das indústrias GPP (371 unidades) e Termelétrica em Santa Catarina

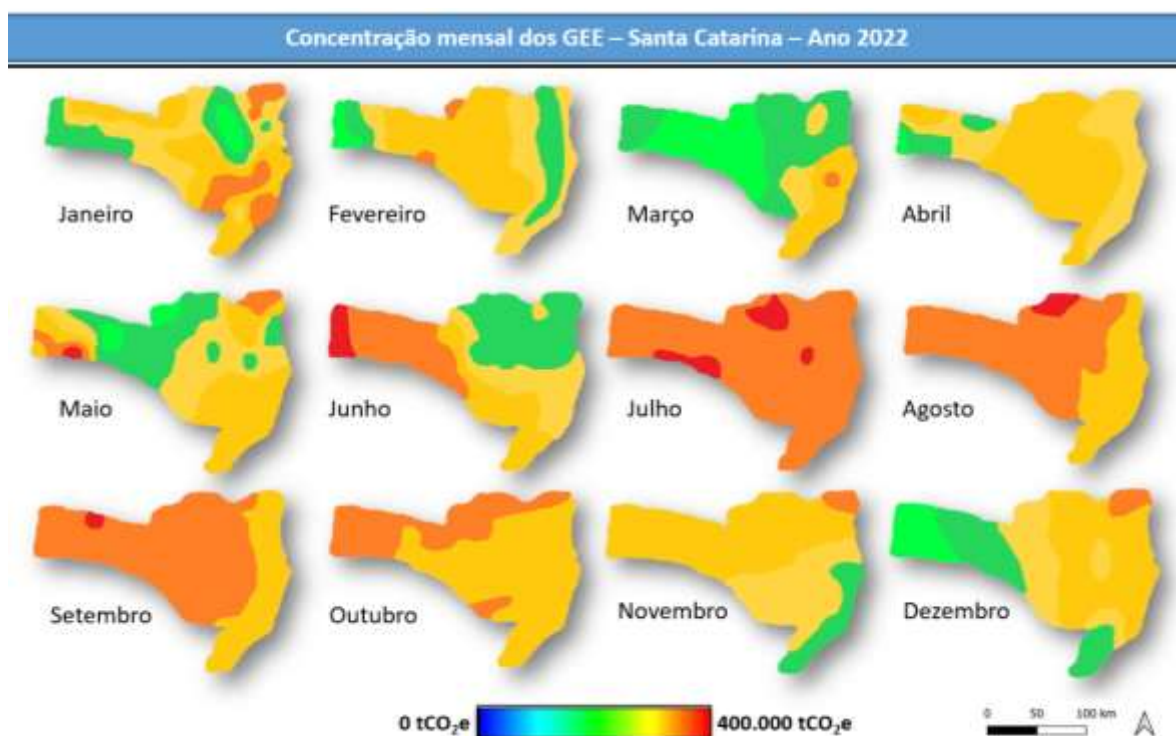


Fonte: Autor, 2025

Com esse conjunto de fontes emissoras devidamente caracterizado, passou-se à etapa de análise da distribuição espacial das emissões de GEE provenientes das atividades industriais no território catarinense. Para tal, elaboraram-se mapas georreferenciados com base nas coordenadas dos empreendimentos industriais identificados. As informações espaciais foram organizadas conforme o Sistema de Referência Geodésico Datum UTM SIRGAS 2000 (zona 22S), e o tratamento cartográfico foi realizado por meio de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), utilizando-se o software Quantum GIS (QGIS). Essa abordagem

permitiu a representação cartográfica das emissões por município, favorecendo a identificação de padrões de concentração espacial de GEE e a delimitação de áreas sob maior pressão ambiental (QGIS, 2023). A Figura 7 apresenta os resultados dessa análise elaborado pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2022), contribuindo para uma compreensão mais abrangente das dinâmicas territoriais associadas às emissões industriais no estado.

Figura 7 – Concentração mensal dos GEE em Santa Catarina.



Fonte: adaptado SEEG (2022).

A cartografia evidencia os municípios com maior intensidade de emissão, representados por tonalidades mais escuras ou densas, indicando zonas de concentração. Tais áreas correspondem, majoritariamente, a regiões com elevado grau de industrialização, como os polos localizados no Vale do Itajaí, Sul Catarinense e Oeste do estado, onde predominam atividades industriais com elevado consumo de combustíveis fósseis. Nota-se uma distribuição heterogênea das emissões ao longo do território em função do detalhamento da análise climática sazonal, com destaque para agrupamentos em regiões específicas, o que sugere padrões territoriais de concentração de emissões relacionados à dinâmica econômica local.

Além de fornecer uma visão espacial, a Figura 7 também permite observar a variação mensal nas emissões, contribuindo para a identificação de possíveis

sazonalidades associadas à produção industrial, à demanda energética ou a outras variáveis operacionais. Essa abordagem espacial e temporal, integrada à análise qualitativa dos setores emissores, fornece subsídios importantes para o planejamento de estratégias de mitigação, alocação de recursos de fiscalização ambiental e formulação de políticas públicas direcionadas à redução das emissões de GEE no estado.

3.1.1.2 Quantificação das fontes de combustões estacionárias de usina termelétrica

As emissões de GEE provenientes das combustões estacionárias em usinas termelétricas configuram-se como uma das principais fontes antrópicas de CO₂ e de outros poluentes atmosféricos, resultantes da queima de combustíveis fósseis, como o carvão mineral. No contexto de Santa Catarina, que ainda mantém em operação uma unidade termelétrica, no município de Capivari de Baixo, baseada em fontes não renováveis, essa contribuição assume relevância significativa no inventário estadual de emissões e se torna um elemento estratégico para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à mitigação climática.

3.1.2 Emissões de GEE provenientes das fontes de combustões móveis rodoviárias

Para elaborar o diagnóstico das emissões de GEE provenientes da combustão das fontes móveis rodoviárias no estado de Santa Catarina, no ano de 2022, optou-se por reunir e analisar informações detalhadas a respeito da frota veicular em circulação. Para isso, buscou-se identificar os tipos e quantidades de veículos, as características de motorização, os padrões de consumo de combustíveis, os fatores de emissão associados, bem como aspectos relacionados à distribuição espacial, como a distribuição geográfica da frota e a intensidade do tráfego urbano. A fim de alcançar tal objetivo, decidiu-se extrair os dados disponíveis no site do Departamento Estadual de Trânsito de Santa Catarina (DETRAN-SC, 2023), órgão vinculado à Secretaria de Estado da Segurança Pública (SSP) que, tem desempenhado funções essenciais de registro, inspeção, fiscalização e controle do trânsito nas vias públicas do estado. Esses dados foram fundamentais para compreender o perfil da frota

catarinense e subsidiar as estimativas das emissões veiculares, considerando a representatividade do setor de transportes na matriz emissora estadual.

Para quantificar inicialmente o consumo de combustíveis por município no estado de Santa Catarina, primeiramente, optou-se por utilizar os dados disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), referentes ao período de janeiro a dezembro de 2022. Essa abordagem permitiu estabelecer uma base confiável para estimar o volume de combustíveis fósseis consumidos regionalmente, com o intuito de planejar e compreender o crescimento das emissões locais de GEE oriundas das combustões móveis rodoviárias. A análise buscou correlacionar a quantidade de combustíveis comercializados com o número de veículos registrados por município, possibilitando identificar padrões espaciais de consumo e inferir o potencial emissor do setor de transportes no território catarinense.

Posteriormente, as emissões de GEE foram estimadas com base na metodologia estabelecida pelo GHG Protocol, conforme a versão de 2022. Para assegurar maior precisão nos resultados, decidiu-se considerar diferentes classes de veículos, com parâmetros específicos de consumo médio de combustíveis e deslocamento diário estimado, de modo a refletir de forma mais fidedigna os padrões reais de uso da frota estadual. Essa abordagem contribuiu para refinar as estimativas e melhorar a representatividade dos resultados obtidos no inventário.

Nesse contexto, decidiu-se segmentar a análise considerando diversas categorias de veículos presentes na frota catarinense (DETRAN, 2023), conforme o tipo de motorização, permitindo estimar de forma mais acurada os padrões de consumo de combustíveis e as respectivas emissões veiculares, tais como: automóveis movidos exclusivamente a álcool, automóveis a gasolina, automóveis com motorização flex (70% gasolina e 30% etanol), caminhões médios a diesel, caminhonetes a diesel, motocicletas a etanol, motocicletas a gasolina, motocicletas flex (70% gasolina e 30% etanol), além de ônibus rodoviários e urbanos movidos a diesel e táxis com motorização flex (70% gasolina e 30% etanol). A inclusão dessas categorias visou abranger a diversidade da frota estadual e representar de forma mais precisa o impacto relativo de cada grupo veicular nas emissões totais de GEE.

3.1.2.1 Quantificação de automóveis

No ano de 2022, registrou-se, no estado de Santa Catarina, uma frota total de 3.396.930 automóveis, composta por diferentes tipos de motorização. Conforme dados do DETRAN/SC (2023), essa frota foi distribuída entre veículos movidos a álcool, diesel comercial, energia elétrica, gasolina veicular e tecnologia flex, incluindo táxis e veículos de aplicativos.

Para fins de estimativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes de combustões móveis rodoviários, considerou-se, com base em metodologias de referência, que os veículos com motorização flex operaram com uma proporção média de 70% de etanol e 30% de gasolina veicular. A definição dessa composição energética mostrou-se essencial para garantir a acuracidade dos cálculos e a representatividade dos resultados no contexto da análise ambiental do estado.

O quadro 2, apresenta os dados referentes à frota de automóveis no estado de Santa Catarina, fornecendo tanto os valores absolutos quanto as frações relativas que cada categoria representa em relação ao total da frota de veículos estadual. Essa caracterização é fundamental para a análise da matriz energética veicular, permitindo compreender o perfil de consumo de combustíveis e subsidiar a estimativa das emissões de GEE provenientes das fontes móveis rodoviárias.

Quadro 2 – Quantificação da frota de automóveis no estado de Santa Catarina em 2022.

Combustível	AUTOMÓVEIS	
	Quantidade	Fração
Álcool	113.384	0,0198703304
Diesel	1.740	0,0003049317
Elétrico	6.104	0,0010697144
Flex	2.038.348	0,3572166116
Gasolina	1.204.354	0,2110607487
Flex (aplicativo/táxi)	33.000	0,0057831873
Total	3.396.930	0,5953055240

Fonte: Detran/SC, 2023.

Para os automóveis movidos exclusivamente a gasolina veicular, adotou-se um consumo médio de 12,8 km/L, considerando um deslocamento diário de 35 km. Os

veículos do tipo flex fuel foram considerados com um consumo médio de 9,2 km/L, mantendo-se a mesma distância média diária percorrida.

Já os automóveis abastecidos exclusivamente com álcool veicular apresentaram um consumo médio de 6,4 km/L, também para um deslocamento diário de 35 km. Por fim, os veículos utilizados em serviços de transporte por aplicativo ou táxi foram considerados com o mesmo consumo médio dos flex fuel (9,2 km/L), porém com um deslocamento significativamente maior, estimado em 135 km por dia.

Com base nessa segmentação, procedeu-se à classificação dos consumos de combustíveis de acordo com o tipo de motorização. Essa diferenciação foi essencial para estimar com maior acurácia as emissões de GEE, uma vez que possibilita considerar as particularidades de cada categoria de veículo. Dessa forma, buscou-se assegurar maior fidelidade aos perfis de consumo e, conseqüentemente, maior precisão nos resultados obtidos no inventário de emissões.

A partir dos dados consolidados de consumo anual, verificou-se que os automóveis movidos exclusivamente a gasolina consumiram aproximadamente 1.527.977.542,97 litros do combustível. Os veículos abastecidos exclusivamente com álcool veicular (etanol hidratado) apresentaram um consumo total de 247.567.523,44 litros.

No caso dos automóveis com motorização flex fuel, estimou-se uma proporção média de uso de 70% gasolina e 30% etanol, conforme observado em estudos nacionais de perfil de abastecimento. Assim, calculou-se um consumo anual de aproximadamente 1.898.797.274,06 litros de gasolina e 1.132.202.101,30 litros de etanol por parte dessa categoria de veículos.

Dessa forma, ao somar os volumes consumidos pelos automóveis a gasolina, álcool veicular (etanol hidratado) e pelas de tecnologia flex, obteve-se um consumo total estimado de 3.426.774.817,03 litros de gasolina e 1.379.769.624,74 litros de etanol. Esses valores são fundamentais para a quantificação das emissões atmosféricas provenientes das combustões móveis rodoviárias, contribuindo para diagnósticos ambientais mais precisos e para a formulação de políticas públicas voltadas à transição energética no setor de transportes.

3.1.2.2 Quantificação de caminhões

No ano de 2022, o estado de Santa Catarina apresentou uma frota total de 239.204 caminhões (DETRAN/SC, 2023), evidenciando a importância do transporte rodoviário de cargas na dinâmica econômica e logística estadual. Essa frota é composta por diferentes categorias de veículos: caminhões leves (de 3,5 a 7,5 toneladas), caminhões médios (com peso inferior a 17 toneladas) e caminhões pesados (com peso superior a 17 toneladas), com predominância movidos a diesel veicular. Para contabilizar os caminhões considerou-se utilizar uma média para esses veículos, que percorram, em média, 146,95 quilômetros por dia, com um consumo médio de combustível de 5,07 km/L.

O Quadro 3, apresenta os dados referentes à frota de caminhões no estado de Santa Catarina, fornecendo tanto o valor absoluto quanto a fração relativa que essa categoria representa em relação ao total da frota de veículos estadual. Essas informações são essenciais para a avaliação do impacto das emissões provenientes do transporte de carga nas análises ambientais e energéticas.

Quadro 3 – Quantificação da frota de caminhões no estado de Santa Catarina em 2022.

Combustível	CAMINHÕES MÉDIA	
	Quantidade	Fração
Diesel	239.204	0,0418296182
Total	239.204	0,0418296182

Fonte: Detran/SC, 2023.

Considerando o perfil de abastecimento predominante no Brasil, observou-se que, para os caminhões movidos a diesel veicular, a mistura utilizada apresenta, em média, uma proporção de 90% de diesel fóssil e 10% de biodiesel, conforme indicam estudos nacionais sobre o consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário. Com base nessa proporção e levando em conta a quilometragem média percorrida, o consumo médio por litro e o tamanho da frota catarinense em 2022, estimou-se que essa categoria de veículos foi responsável por um consumo anual de aproximadamente 2.271.144.744,45 litros de diesel fóssil e 252.349.416,05 litros de biodiesel. Esses valores reforçam a magnitude do uso de combustíveis no transporte

de cargas e evidenciam a importância de estratégias voltadas à eficiência energética e à ampliação do uso de fontes renováveis no setor.

Esses indicadores permitem estimar não apenas o volume expressivo de diesel consumido anualmente, mas também os impactos ambientais decorrentes da emissão de GEE, como o dióxido de carbono (CO₂).

3.1.2.3 Quantificação de caminhonetes

No ano de 2022, o estado de Santa Catarina registrou uma frota total de 203.920 caminhonetes a diesel (DETRAN/SC, 2023). Para representar com maior precisão os diferentes perfis de uso e consumo, optou-se por segmentar a frota conforme o tipo de motorização, permitindo estimar de forma mais acurada os padrões de consumo de combustíveis e as respectivas emissões veiculares.

As caminhonetes com motorização a gasolina, álcool e flex foram agrupadas, para fins de cálculo das emissões, juntamente com os automóveis dessas mesmas categorias. Tal procedimento metodológico se justifica pela similaridade observada entre esses veículos quanto ao rendimento energético, padrões médios de consumo de combustível e fatores de emissão, conforme estabelecido em diretrizes técnicas utilizadas em inventários de emissões veiculares. Essa consolidação visa garantir maior coerência e precisão nas estimativas de emissões provenientes das combustões móveis rodoviárias no estado de Santa Catarina.

O Quadro 4, apresenta os dados referentes à frota de caminhonetes no estado de Santa Catarina, fornecendo tanto os valores absolutos quanto a fração relativa que essa categoria representa em relação ao total da frota de veículos estadual. Essas informações são essenciais para a avaliação do impacto das emissões provenientes do transporte de carga nas análises ambientais e energéticas.

Quadro 4 – Quantificação da frota de caminhonetes no estado de Santa Catarina em 2022.

Combustível	CAMINHONETES	
	Quantidade	Fração
Álcool	10.642	0,0018649903
Diesel	203.920	0,0357365923
Elétrico	3.909	0,0006850448

Flex	349.757	0,0612942493
Gasolina	168.110	0,0294609579
GNV	2	0,0000003505
Total	736.340	0,1290421850

Fonte: Detran/SC, 2023.

Estima-se que esses veículos percorram, em média, 68 quilômetros por dia, com um consumo médio de combustível de 10,7 km/L (CONSUMO DE COMBUSTÍVEL, 2024).

Considerando o perfil de abastecimento predominante no Brasil, observou-se que, para as caminhonetes movidos a diesel veicular, a mistura utilizada apresenta, em média, uma proporção de 90% de diesel fóssil e 10% de biodiesel, conforme indicam estudos nacionais sobre o consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário. Com base nessa proporção e levando em conta a quilometragem média percorrida, o consumo médio por litro e o tamanho da frota catarinense em 2022, estimou-se que essa categoria de veículos foi responsável por um consumo anual de aproximadamente 425.716.351,40 litros de diesel fóssil e 47.301.816,82 litros de biodiesel.

3.1.2.4 Quantificação de motocicletas

No ano de 2022, o estado de Santa Catarina registrou uma frota total de 1.292.132 motocicletas (DETRAN/SC, 2023), considerando motocicletas movidas a gasolina, motocicletas com motorização flex operaram com uma proporção média de 70% de etanol e 30% de gasolina veicular.

O Quadro 5, apresenta os dados referentes à frota de motocicletas no estado de Santa Catarina, fornecendo tanto os valores absolutos quanto as frações relativas que essa categoria representa em relação ao total da frota de veículos estadual. Essas informações são essenciais para a avaliação do impacto das emissões provenientes do transporte de carga nas análises ambientais e energéticas.

Quadro 5 – Quantificação da frota de motocicletas no estado de Santa Catarina em 2022.

Combustível	MOTOCICLETAS	
	Quantidade	Fração
Álcool	325	0,0000569556
Diesel	82	0,0000143703
Elétrico	952	0,0001668362
Flex	319.142	0,0559290287
Gasolina	972.990	0,1705146476
Total	1.293.491	0,2266818385

Fonte: Detran/SC, 2023.

Para estimar o consumo anual de combustíveis pelas motocicletas em circulação no estado de Santa Catarina, considerou-se uma quilometragem média diária de 28,6 km por veículo, com um consumo médio de 45 km por litro de combustível, valores compatíveis com estudos técnicos sobre o desempenho energético dessa categoria veicular.

A partir desses parâmetros e dos dados consolidados da frota, verificou-se que as motocicletas movidas exclusivamente a gasolina consumiram aproximadamente 225.712.058 litros desse combustível ao longo do ano-base analisado.

Já para as motocicletas com motorização flex fuel, adotou-se uma proporção média de uso de 70% gasolina e 30% etanol, conforme observado em estudos nacionais que analisam o perfil de abastecimento desse tipo de veículo. Com base nessa premissa, foi possível estimar um consumo anual adicional de aproximadamente 51.823.696,37 litros de gasolina e 28.984.094,69 litros de etanol.

Dessa forma, ao somar os volumes consumidos pelas motocicletas exclusivamente a gasolina e pelas de tecnologia flex, obteve-se um consumo total estimado de 277.535.754,37 litros de gasolina e 28.984.094,69 litros de etanol. Esses valores são fundamentais para a quantificação das emissões atmosféricas provenientes das combustões móveis rodoviárias, contribuindo para diagnósticos ambientais mais precisos e para a formulação de políticas públicas voltadas à transição energética no setor de transportes.

3.1.2.5 Quantificação de ônibus

Em 2022, o estado de Santa Catarina contabilizou-se uma frota total de 36.532 ônibus registrados, composta por 29.956 unidades destinadas ao transporte urbano e 6.576 ao transporte rodoviário. Ambos os segmentos operaram majoritariamente com motorização a diesel veicular, o que reforça a relevância desse tipo de combustível nas emissões provenientes do setor de transporte coletivo (DETRAN/SC, 2023).

Apresentam-se os dados referentes à frota de ônibus no estado de Santa Catarina (quadro 6), fornecendo tanto os valores absolutos quanto as frações relativas que cada categoria representa em relação ao total da frota de veículos estadual.

Quadro 6 – Quantificação da frota de ônibus no estado de Santa Catarina em 2022.

Veículos	Combustível	ÔNIBUS	
		Quantidade	Fração
Ônibus Urbano	Diesel	29.956	0,0050840000
Ônibus Rodoviário	Diesel	6.576	0,0011160000
	Total	29.956	0,0050840000

Fonte: Detran/SC, 2023.

Estima-se que esses veículos percorram, em média, para os ônibus urbanos 158 quilômetros por dia e os ônibus rodoviários 178 quilômetros por dia, com um consumo médio de combustível de 2,1 km/L para os ônibus urbanos e 3,4 km/L para os rodoviários.

A partir dos dados consolidados de consumo anual, verificou-se que os ônibus urbanos e ônibus rodoviários movidos a diesel veicular consumiram aproximadamente 916.381.676,64 litros do combustível.

No caso dos ônibus urbanos e ônibus rodoviários movidos a diesel veicular, estimou-se uma proporção média de uso de 90% de diesel fóssil e 10% de biodiesel, conforme observado em legislações nacionais de perfil de abastecimento. Assim, calculou-se um consumo anual de aproximadamente 824.743.508,98 litros de diesel fóssil e 91.638.167,66 litros de biodiesel por parte dessa categoria de veículos.

3.1.3 Projeções de cenários de transição energética

3.1.3.1 Transição energética de fontes de combustões estacionárias

Com base nos dados referentes às emissões provenientes da queima de combustíveis em fontes estacionários no ano de 2022, no estado de Santa Catarina, buscou-se projetar cenários futuros (quadro 7) de transição energética no setor industrial. O objetivo consistiu em avaliar o potencial de redução nas emissões de GEE a partir do aumento progressivo da participação de biocombustíveis na matriz energética industrial.

Para as indústrias com GPP e termelétrica, considerou-se o cenário atual (Cenário 1), no qual 100% do combustível consumido corresponde à combustível fóssil. A partir desse ponto de partida, foram estabelecidos cenários evolutivos, nos quais se projeta, para 2030 (Cenário 2), uma proporção de 60% de combustíveis fósseis e 40% de biocombustíveis; para 2040 (Cenário 3), uma inversão na composição, com 40% de fósseis e 60% de renováveis; culminando, em 2050 (Cenário 4), na substituição completa por biocombustíveis, com 100% das indústrias com GPP e termelétrica operando com biocombustíveis.

Quadro 7 - Projeção de cenários, alterando a proporção de combustíveis para fontes estacionárias.

CENÁRIOS			PROPORÇÃO			
			Cenário 1 (2022)	Cenário 2 (2030)	Cenário 3 (2040)	Cenário 4 (2050)
Indústrias GPP	Combustível Fóssil	Coque Carvão Mineral, Óleo Diesel	100%	60%	40%	0%
	Biocombustível	Biogás, Biomassa	0%	40%	60%	100%
Termelétrica	Combustível Fóssil	Carvão CE-4500 kcal/kg	100%	60%	40%	0%
	Biocombustível	Biogás	0%	40%	60%	100%

Fonte: Autor, 2024.

A partir desses cenários, procurou-se estabelecer uma correlação direta entre a ampliação da participação de biocombustíveis e a redução das emissões de GEE,

considerando os efeitos positivos esperados no contexto da mitigação das mudanças climáticas e da promoção de um modelo de mobilidade mais sustentável.

3.1.3.2 Transição energética de fontes de combustões móveis rodoviárias

Com base nos dados referentes às emissões provenientes da queima de combustíveis em fontes móveis rodoviárias no ano de 2022, no estado de Santa Catarina, projetou-se cenários futuros de transição energética no setor de transportes rodoviários, conforme apresentado no quadro 8. O objetivo consistiu em avaliar o potencial de redução nas emissões de GEE a partir do aumento progressivo da participação de biocombustíveis na matriz energética veicular.

Para os veículos leves, considerou-se o cenário atual (Cenário 1), no qual 73% do combustível consumido corresponde à gasolina automotiva pura (combustível fóssil) e 27% ao etanol anidro (biocombustível). A partir desse ponto de partida, foram estabelecidos cenários evolutivos, nos quais se projeta, para 2030 (Cenário 2), uma proporção de 60% de combustíveis fósseis e 40% de biocombustíveis; para 2040 (Cenário 3), uma inversão na composição, com 40% de fósseis e 60% de renováveis; culminando, em 2050 (Cenário 4), na substituição completa por biocombustíveis, com 100% da frota leve operando com etanol anidro.

Da mesma forma, foram elaborados cenários para os veículos pesados, cuja matriz energética atual (Cenário 1) é composta por 90% de óleo diesel puro (fóssil) e 10% de biodiesel B100 (biocombustível). Considerando a necessidade de alinhamento com metas de descarbonização de longo prazo, projetou-se, para 2030 (Cenário 2), uma proporção de 60% de diesel e 40% de biodiesel; para 2040 (Cenário 3), uma relação de 40% e 60%, respectivamente; e, finalmente, para 2050 (Cenário 4), a completa substituição por biodiesel, com 100% da matriz energética composta por combustível renovável.

Quadro 8 - Simulação de cenários, alterando a proporção de combustíveis para fontes móveis rodoviárias.

CENÁRIOS	PROPORÇÃO			
	Cenário 1 (2022)	Cenário 2 (2030)	Cenário 3 (2040)	Cenário 4 (2050)

Veículos Leves	Combustível Fóssil	Gasolina Automotiva	73%	60%	40%	0%
	Biocombustível	Etanol Anidro	27%	40%	60%	100%
Veículos Pesados	Combustível Fóssil	Óleo Diesel	90%	60%	40%	0%
	Biocombustível	Biodiesel (B 100)	10%	40%	60%	100%

Fonte: Autor, 2024.

A partir desses cenários, procurou-se estabelecer uma correlação direta entre a ampliação da participação de biocombustíveis e a redução das emissões de GEE, considerando os efeitos positivos esperados no contexto da mitigação das mudanças climáticas e da promoção de um modelo de mobilidade mais sustentável.

3.1.3.3 Equivalência Energética entre Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis

Para a estimativa das emissões, considerou-se o poder calorífico dos combustíveis fósseis e seus respectivos fatores de substituição por biocombustíveis. A conversão foi realizada com base na equivalência energética, utilizando os valores em gigajoules por tonelada (GJ/t) para determinar a quantidade necessária de biocombustível que forneça a mesma energia do combustível fóssil substituído, assegurando a comparabilidade entre os diferentes cenários de uso energético.

O quadro 9, apresenta o poder calorífico de diferentes combustíveis fósseis, expresso em gigajoules por tonelada (GJ/t), juntamente com os respectivos fatores multiplicadores para substituição por biocombustíveis equivalentes. O fator multiplicador indica a quantidade relativa de biocombustível necessária para fornecer a mesma energia do combustível fóssil correspondente.

O coque de carvão mineral possui um poder calorífico de 28,90 GJ/t e apresenta um fator multiplicador de 2,22 quando substituído por biomassa (lenha). Já o carvão com poder calorífico de 4500 kcal/kg apresenta 17,80 GJ/t, com fator de 1,37, também substituído por biomassa (lenha). O diesel puro, com 42,30 GJ/t, pode ser substituído por biodiesel, considerando um fator de 1,12. Por fim, a gasolina, que possui um poder calorífico de 43,50 GJ/t, tem um fator de 1,49 quando substituída por etanol.

Os fatores multiplicadores são fundamentais para estimativas de equivalência energética em análises comparativas de emissões GEE, especialmente em cenários de transição energética e substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis.

Quadro 9 - Equivalência Energética entre Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis.

Combustível Fóssil Atual	Poder Calorífico (GJ/t)	Biocombustível Proposto	Poder Calorífico (GJ/t)	Fator multiplicador
Coque Carvão Mineral	28,90	Biomassa (lenha)	13	2,22
Carvão 4500 kcal/kg	17,80	Biomassa (lenha)	13	1,37
Diesel (puro)	42,30	Biodiesel	37,7	1,12
Gasolina	43,50	Etanol	28,3	1,49

Fonte: Autor, 2024.

3.2 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES DE FONTES ESTACIONÁRIAS E FONTES MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA

Determinou-se o inventário de emissões de GEE por meio da aplicação da ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol, reconhecida por sua padronização metodológica na quantificação de emissões estacionárias e móveis rodoviárias no Brasil.

A ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol, ou seja, "Protocolo Brasileiro de GEE", na versão 2023, reconhecido internacionalmente, trata-se de uma plataforma online que auxilia as organizações na publicação de seus inventários de emissões corporativas de GEE. Desenvolvido pelo FGVces e WRI, em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (Cebds), World Business Council for Sustainable Development (WBSCD) e 27 Empresas Fundadoras.

A metodologia adotada pelo Programa Brasileiro GHG Protocol estabelece uma sequência estruturada de etapas para a elaboração de inventários de emissões de GEE, contemplando os Escopos 1 (emissões diretas), 2 (emissões indiretas associadas à energia adquirida) e 3 (outras emissões indiretas). Neste estudo, optou-se por concentrar a análise no Escopo 1, com foco específico nas emissões diretas

provenientes da queima de combustíveis fósseis em fontes móveis rodoviárias (veículos automotores) e estacionárias (instalações industriais e termelétrica) com GPP. Para esse fim, foram considerados exclusivamente os dados referentes ao ano de 2022, no estado de Santa Catarina.

Complementarmente, procedeu-se à quantificação das emissões diretas de GEE para cada um dos gases individualmente, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e monóxido de carbono (CO), com os resultados expressos em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e).

Para a conversão das emissões, utilizou-se a tabela de fatores de conversão disponibilizada pelo Programa Brasileiro GHG Protocol, com os valores expressos em CO_2e . Essa conversão considerou o Potencial de Aquecimento Global (GWP) específico de cada GEE, permitindo uniformizar os resultados em uma unidade comum e, assim, facilitar a comparação entre os diferentes gases quanto à sua contribuição relativa para o aquecimento global.

A quantificação das emissões diretas provenientes das combustões estacionárias nas organizações e móveis rodoviários foram conduzidas por meio das seguintes etapas: identificação e quantificação dos combustíveis fósseis utilizados, coleta dos fatores de emissão correspondentes e posterior cálculo das emissões de GEE.

Considerando a importância da fundamentação metodológica em estudos de emissões atmosféricas, especialmente aqueles voltados à contabilização e mitigação dos GEE, ressalta-se que o Programa Brasileiro GHG Protocol estrutura-se com base em um conjunto abrangente de referências técnicas e científicas reconhecidas tanto em nível nacional quanto internacional. Essas fontes subsidiam a elaboração de inventários de fontes estacionárias e fontes móveis rodoviárias de emissões, fornecendo parâmetros confiáveis para o cálculo, reporte e verificação das emissões de GEE.

Entre as principais referências utilizadas destacam-se os manuais metodológicos do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006, 2013, 2019), amplamente adotados como padrão internacional para estimativas de emissões e as diretrizes da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2007) e os fatores de emissão disponibilizados pelo Departamento de Meio Ambiente, Alimentação e Assuntos Rurais do Reino Unido (DEFRA, 2024). No contexto nacional, são incorporadas contribuições de órgãos técnicos e reguladores,

como o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTIC, 2016), o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011, 2014), a Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2022), a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017, 2023), e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018), entre outros.

Além disso, integram-se documentos normativos e regulatórios relevantes, como as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1995) e do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2013), as diretrizes da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2012), os dados energéticos do Balanço Energético Nacional (BEM, 2024) e orientações setoriais de entidades (SEESP, 2011; Ashrae, 2019). Também se incorporam evidências de estudos acadêmicos consolidados, como Novaes *et al.* (2017), que contribuem para o aprimoramento contínuo da metodologia.

Essa ampla base de referências permite assegurar a integridade científica e a transparência dos processos de mensuração, conferindo legitimidade aos resultados obtidos e fortalecendo a comparabilidade com inventários produzidos em outras regiões ou por diferentes organizações. Dessa forma, o GHG Protocol se consolida como uma ferramenta estratégica para o monitoramento das emissões e o planejamento de ações de mitigação no contexto das mudanças climáticas.

3.2.1 Emissões de GEE provenientes das combustões de fontes estacionárias de GPP e Termelétrica

Para a determinação do inventário das emissões diretas de GEE das combustões estacionárias, aplicou-se a ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol, versão adaptada para o Brasil, que consiste em uma plataforma desenvolvida para auxiliar nos cálculos de emissões de GEE, fornece-se o consumo anual de combustíveis no estado, com base em dados previamente tratados, sendo carvão mineral, biogás, biomassa, coque de carvão mineral, ou óleo diesel, e a ferramenta calcula automaticamente com base nas informações de fator de emissão da combustão do combustível, posteriormente, obtendo-se como resultado a quantidade das emissões de GEE totais em toneladas de CO₂e.

Apresentam-se, no Quadro 9, os principais combustíveis utilizados no estado de Santa Catarina no ano de 2022, juntamente com seus respectivos poderes

caloríficos específicos, expressos em gigajoules por tonelada (GJ/t). Esses valores foram obtidos a partir do Programa Brasileiro GHG Protocol (FGV, 2022) e constituem a base para os cálculos das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE), conforme a metodologia adotada neste estudo.

Quadro 9 – Fatores de emissões de CO₂ dos combustíveis industriais.

Combustível	Poder Calorífico GJ/t
Coque Carvão Mineral	28,90
Carvão 4500 kcal/kg	17,80
Diesel (puro)	42,30
Gasolina	43,50
Etanol	28,30
Biometano	49,00
Biodiesel	37,70
Biogás	20,00
Biomassa (resíduos vegetais)	11,60
Biomassa (lenha)	13,00
Biomassa (líxivia)	12,00

Fonte: Programa Brasileiro GHG Protocol, 2023.

3.2.2 Emissões de GEE provenientes das combustões de fontes móveis rodoviárias

Para a determinação do inventário das emissões diretas de GEE das combustões móveis rodoviárias, aplicou-se a ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol, versão adaptada para o Brasil, que consiste em uma plataforma desenvolvida para auxiliar nos cálculos de emissões de GEE, fornece-se o consumo anual de combustíveis no estado, com base em dados previamente tratados, sendo gasolina, álcool, etanol ou diesel, e a ferramenta calcula automaticamente com base nas informações de fator de emissão da combustão do combustível e a legislação vigente, que estipula a quantidade de biocombustível adequado, posteriormente, obtendo-se como resultado a quantidade das emissões de GEE totais em toneladas de CO₂e.

Ressalta-se que, no contexto brasileiro, determinados combustíveis fósseis possuem, por exigência legal, um percentual de biocombustíveis incorporado antes da comercialização ao consumidor final. Em 2022, essas proporções eram de 27% de etanol anidro adicionado à gasolina (E27) e 10% de biodiesel adicionado ao diesel (B10). Tais percentuais foram devidamente considerados nos cálculos de emissões de gases de efeito estufa.

Apresenta-se como fatores de emissão (quadro 10), de dióxido de carbono (CO₂), expressos em quilogramas por litro (kgCO₂/L), para os principais combustíveis utilizados no estado. Os valores estão discriminados entre a fração fóssil e a fração de biocombustível presente em cada mistura, considerando as proporções estabelecidas pela legislação brasileira vigente no ano de 2022. Esses valores foram extraídos do Programa Brasileiro GHG Protocol (FGV, 2022) e utilizados como base para os cálculos das emissões totais de GEE, conforme previsto na metodologia adotada neste estudo.

Quadro 10 – Fatores de emissões de CO₂ dos combustíveis rodoviários.

Combustível	Fatores de emissão do combustível	
	Fóssil kgCO ₂ /L	Biocombustível kgCO ₂ /L
Etanol Hidratado	0,00	1,51
Gasolina veicular	2,24	1,51
Diesel comercial	2,60	2,43

Fonte: Programa Brasileiro GHG Protocol, 2023.

Na etapa de coleta de dados, reuniram-se informações referentes à quantidade de combustível consumido anualmente nas combustões, expressa em litros, conforme o tipo de combustível utilizado.

As emissões dos diferentes gases de efeito estufa (GEE) foram expressas em unidades de Potencial de Aquecimento Global (GWP – Global Warming Potential), que permite comparar o impacto relativo de cada gás em relação ao dióxido de carbono (CO₂), sendo os resultados representados em termos de CO₂ equivalente (CO₂e).

Essa métrica foi utilizada para quantificar e comparar os GEE com base em sua capacidade de reter calor na atmosfera e contribuir para o aquecimento global.

3.3 ESTIMATIVA DOS IMPACTOS DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA NO AQUECIMENTO GLOBAL.

Para estimar os impactos das emissões de GEE, provenientes tanto de fontes estacionárias quanto móveis rodoviárias no estado de Santa Catarina, sobre o aquecimento global, foi empregada a equação proposta por Ellis (2013). Essa metodologia permite estabelecer uma correlação entre as concentrações atmosféricas de CO₂ e o aumento da temperatura média global, fornecendo uma base científica para avaliar os efeitos dessas emissões sobre o sistema climático.

Para as simulações, utilizou-se como referencial a maior concentração de CO₂ de 415 ppm e a temperatura média global de 15°C em 2022 (IPCC, 2022). As concentrações de CO₂ em partes por milhão para cada cenário proposto foram subsequentemente determinadas por meio da aplicação do método da regra de três, utilizando-se como comparativo as emissões calculadas de 2022 e a concentração máxima de CO₂ registrada, obtendo as concentrações estimadas para os cenários propostos.

A aplicação da equação 2, também possibilita inferir potenciais consequências regionais, como o agravamento de eventos climáticos extremos a exemplo de chuvas intensas, estiagens prolongadas e elevação do nível do mar, que impactam diretamente a realidade socioambiental de Santa Catarina.

$$\Delta T = 1,66 \ln (C/C0) \quad (2)$$

Onde:

- ΔT representa a variação da temperatura média global, expressa em graus Celsius (°C);
- C0 corresponde à concentração inicial de CO₂ na atmosfera, em partes por milhão (ppm);
- C refere-se à concentração final de CO₂, utilizada como base para estimar o aumento da temperatura global resultante das emissões adicionais.

Segundo Ellis (2013), uma duplicação instantânea na concentração de CO₂ na atmosfera intensifica sua opacidade à radiação térmica, dificultando a dissipação do calor para o espaço e resultando em um acréscimo aproximado de 4 Watts/m² na retenção de energia.

Para estimar o consequente aumento da temperatura global, é necessário calcular qual elevação térmica seria suficiente para que a Terra emitisse essa quantidade adicional de energia, restabelecendo, assim, o equilíbrio radiativo do sistema climático. Quando se aplica a equação 2, considerando a duplicação da concentração de CO₂ (isto é, $C = 2C_0$), obtém-se como resultado um aumento estimado de 1,2 °C na temperatura média global. Essa equação expressa, portanto, a variação da temperatura (ΔT) em função da mudança na concentração de CO₂, que passa de um valor inicial C_0 para um valor final C , ambos expressos em partes por milhão (ppm).

3.4 ESTIMATIVA E MODELAGEM DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES

Para simular a concentração e o comportamento atmosférico dos poluentes no território de Santa Catarina, empregou-se o Modelo Weather Research and Forecasting with Chemistry (WRF-Chem), versão 3.4. Este é um modelo atmosférico de mesoescala com química acoplada, capaz de simular de forma integrada a interação entre os processos meteorológicos e químicos.

O domínio do modelo foi configurado para abranger todo o estado de Santa Catarina, utilizando uma resolução espacial horizontal de 5 km (definida por 160 pontos no eixo leste-oeste e 110 pontos no eixo norte-sul) e 31 níveis verticais. Após uma série de testes iniciais para ajustar as parametrizações e a definição do domínio, optou-se por uma grade única de 5 km, visto que configurações com grade aninhada não demonstraram melhorias significativas nos resultados para os objetivos da pesquisa.

Para a inicialização do modelo e o fornecimento das condições de contorno, empregaram-se dados de entrada específicos. As condições meteorológicas, tanto de níveis de pressão quanto de superfície, foram obtidas da reanálise ERA5 (EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS, 2023), do Copernicus Climate Change Service, com disponibilidade em intervalos de 6 horas. As condições químicas de contorno, referentes às concentrações de fundo de CO,

CO₂ e CH₄, utilizaram dados do GEOS5 (NASA GLOBAL MODELING AND ASSIMILATION OFFICE, 2023) para o CO₂, e do WACCM (NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH, 2023) para o CO e o CH₄, acessados via o portal do National Center for Computational Sciences (NCCS) da NASA. Tais condições de contorno são fundamentais para representar adequadamente a composição química atmosférica ao longo do domínio simulado, permitindo uma avaliação robusta da influência das emissões regionais.

O processo de modelagem envolveu etapas detalhadas de preparação dos dados para o WRF-Chem. Inicialmente, o WPS (WRF Preprocessing System) foi utilizado para interpolar as condições meteorológicas e geográficas (como uso do solo e topografia) para a grade do modelo. Os dados de emissão, que são o foco deste estudo e foram levantados especificamente para o estado de Santa Catarina, foram construídos por meio de um programa desenvolvido em Fortran. É importante ressaltar que essas emissões foram geradas em dois níveis verticais para uma melhor representação na atmosfera. Este programa foi responsável por gerar um arquivo binário contendo os dados de emissão de fontes estacionárias e móveis rodoviárias para a grade do modelo. Posteriormente, esses dados binários foram convertidos para o formato compatível com o WRF utilizando o utilitário **convert_emis** (da versão 3.4 do WRF), e as condições iniciais e de contorno para a química foram inseridas via o utilitário MOZBC. A metodologia química para o tratamento das emissões seguiu as diretrizes do GHG Protocol.

A avaliação das emissões estimadas foi realizada por meio de simulações quantitativas de qualidade do ar em escala regional. Para isso, o período de 8 a 14 de julho de 2022 foi selecionado, uma semana caracterizada por temperaturas amenas, ausência de precipitações e céu predominantemente limpo em Santa Catarina. Essas condições meteorológicas são ideais para a verificação das concentrações, pois favorecem a estabilidade atmosférica e uma dispersão limitada de poluentes, o que contribui para a acurácia das simulações.

No modelo WRF-Chem, as concentrações atmosféricas de gases e poluentes são o resultado das complexas interações simuladas e não são diretamente medidas ou obtidas de fontes externas como as emissões. Elas são calculadas dinamicamente pelo modelo, que integra as emissões de GEE (provenientes dos dados levantados para Santa Catarina e processados em dois níveis verticais conforme o GHG Protocol), as condições meteorológicas (da reanálise ERA5), e as concentrações

químicas de fundo (do GEOS5 para CO_2 e WACCM para CO e CH_4). O WRF-Chem então transporta, dispersa e reage quimicamente essas espécies, além de considerar processos de deposição, resolvendo as equações atmosféricas em cada ponto da grade de simulação para gerar as concentrações finais.

O WRF-Chem, como um sistema acoplado, combina a modelagem meteorológica geoespacial com a modelagem química da atmosfera de forma totalmente integrada. Ambas as componentes compartilham os mesmos esquemas de transporte e a mesma grade de resolução (5 km horizontal e 31 níveis verticais), além de parametrizações físicas comuns aplicadas ao transporte sub-grade. O modelo incorpora uma variedade de processos atmosféricos relevantes, incluindo emissões antropogênicas, biogênicas, deposição seca e esquemas de fotólise acoplados com hidrometeoros e aerossóis (Grell et al., 2005). Sua flexibilidade permite a integração de diversos módulos complementares (Skamarock et al., 2008), tais como: predição e simulação do tempo ou clima regional (REAL); modelagem acoplada tempo/dispersão/qualidade do ar com interação química completa (CHEM), incluindo previsão de ozônio, radiação ultravioleta, material particulado e processos associados às mudanças climáticas; simulações de alta resolução (LES); e modelagem de queimadas (FIRE), entre outros (Iriart; Fisch, 2016). Nesta pesquisa, a aplicação do WRF-Chem concentrou-se especificamente na simulação da dispersão de gases de efeito estufa (GEE), com base nas emissões diretas provenientes das combustões estacionárias e móveis rodoviárias no estado de Santa Catarina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA

Considerando a relevância das emissões de GEE provenientes das combustões diretas de fontes estacionárias e móveis rodoviárias no estado de Santa Catarina, procedeu-se à construção de cenários e à sistematização dos dados coletados, com o objetivo de estimar quantitativamente as emissões. Para tal, foi utilizada a ferramenta disponibilizada pelo Programa Brasileiro GHG Protocol, amplamente reconhecida por sua aplicação em inventários corporativos e setoriais. As variáveis inseridas na plataforma foram obtidas por meio da análise e tratamento de dados de consumo energético, sendo complementadas por informações técnicas extraídas de fontes bibliográficas e documentações setoriais, conforme os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa.

No ano de 2022, a análise das fontes estacionárias revelou uma emissão atmosférica total de 4.298.122,84 tCO₂e, predominantemente proveniente de atividades industriais e da geração termelétrica. Complementarmente, no contexto das emissões atmosféricas associadas às fontes móveis rodoviárias, obteve-se um total de 20.367.486,64 tCO₂e, originário do setor de transportes.

No caso específico de Santa Catarina, Lamim *et al.* (2024) estimaram e simularam as emissões de CO₂e no sistema modal portuário do estado, utilizando o GHG Protocol (Escopo 1) e o modelo de química atmosférica WRF-Chem. O estudo evidenciou que a substituição do transporte rodoviário pelo ferroviário pode reduzir as emissões em até 43%. Francisconi Junior *et al.* (2016) também contribuíram com o tema ao quantificarem as emissões de GEE em projetos rodoviários estaduais por meio do modelo HDM-4, destacando a importância de avaliações amplas que transcendam as obras de infraestrutura.

Adicionalmente, Lamim *et al.* (2024) aplicaram o modelo WRF-Chem para mapear a concentração do CO₂ no território catarinense, com destaque para o litoral, o Médio Vale do Itajaí e o Oeste do estado. As simulações identificaram concentrações elevadas de poluentes atmosféricos e regiões com maior vulnerabilidade à poluição, fornecendo subsídios relevantes para a gestão ambiental regional.

Dessa forma, a análise das emissões de gases de efeito estufa provenientes de fontes estacionárias e móveis rodoviárias em Santa Catarina demonstra a importância da utilização de ferramentas metodológicas consolidadas, como o GHG Protocol. Estudos nacionais e internacionais reforçam a necessidade de abordagens geoespaciais e diferenciadas por fonte emissora, o que se mostra essencial para a formulação de estratégias locais de transição energética e sustentabilidade.

4.1.1 Emissões de GEE diretas de fontes estacionárias

A estimativa total das emissões provenientes de fontes estacionárias no estado de Santa Catarina alcançou 4.298.122,84 tCO₂e, resultado da atividade de 371 indústrias (quadro 11), classificadas como de GPP, acrescido de uma usina termelétrica (quadro 12). O volume significativo das emissões reflete a concentração de processos industriais intensivos em combustão e uso de combustíveis fósseis, característicos de setores com elevado impacto ambiental.

As estimativas abrangem três marcos temporais, 2030, 2040 e 2050, que refletem cenários progressivos de substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis: em 2030, considera-se um cenário com 60% de uso de combustíveis fósseis e 40% de biocombustíveis; em 2040, o cenário é de 40% de combustíveis fósseis e 60% de biocombustíveis; e, em 2050, projeta-se a substituição total, com 100% do consumo energético proveniente de biocombustíveis.

Dessa forma, as projeções apresentadas (quadro 11) permitiram estimar as emissões de GEE provenientes de fontes estacionárias em indústrias classificadas como GPP no estado de Santa Catarina, expressas em tCO₂e. A organização dos dados por município, conforme a quantidade de indústrias identificadas, possibilitou uma análise detalhada do perfil emissor regional. Considerando-se os combustíveis atualmente utilizados, bem como os propostos para substituição, foi possível avaliar as variações nas emissões em diferentes cenários, fornecendo subsídios relevantes para a definição de estratégias de mitigação e políticas públicas voltadas à descarbonização do setor industrial.

O quadro 11 também apresenta os valores de emissão referentes ao ano-base de 2022, permitindo a comparação entre o cenário atual e as projeções futuras. Essa abordagem visa quantificar o potencial de mitigação de emissões associado à transição energética no setor industrial catarinense, pormenorizado no Apêndice A.

Quadro 11 – Projeções das emissões estacionárias por indústrias de GPP em Santa Catarina, em tCO₂e, para os anos de 2030, 2040 e 2050 conforme cenários, considerando a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis.

	Emissões			
	2022	2030	2040	2050
Total de emissões (tCO ₂ e)	950.971	929.879	919.333	898.241

Fonte: Autor, 2023.

No âmbito das emissões atmosféricas de GEE provenientes de fontes de combustão estacionária no estado de Santa Catarina, observa-se a predominância da geração termelétrica no município de Capivari de Baixo, figura 8, como principal responsável por esse tipo de emissão. Esse setor, reconhecido pelo elevado potencial poluidor, responde por aproximadamente 76,5% das emissões totais associadas a essas fontes no estado. Tal concentração está diretamente vinculada ao uso intensivo de combustíveis fósseis de alto poder calorífico, especialmente o carvão mineral, ainda amplamente empregado na matriz energética local.

Figura 8 – Distribuição geográfica da Termelétrica em Santa Catarina



Fonte: Autor, 2025

Em 2022, a usina termelétrica em operação no território catarinense utilizou como combustível primário o carvão CE-4500 kcal/kg, cuja elevada capacidade energética contribui para altos níveis de geração térmica, embora com consideráveis

impactos ambientais (ENGIE, 2019). Nesse período, o consumo dessa matéria-prima alcançou 1.956.757,89 toneladas, o que resultou na emissão de 3.347.151,78 tCO₂e (quadro 12), refletindo a relevância ambiental do setor na composição das emissões estaduais.

Como alternativa às fontes fósseis de alta emissão, propõe-se a utilização do biogás, nas proporções estabelecidas pelos cenários projetados, por se tratar de um combustível renovável gerado a partir da decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos. Com alto poder calorífico médio entre 5.000 e 7.000 kcal/m³, o biogás apresenta potencial energético significativo, além de proporcionar redução nas emissões de GEE (Quadro 12), ao aproveitar resíduos agroindustriais, urbanos e sanitários que, de outra forma, liberariam metano diretamente na atmosfera. Sua adoção contribui para a diversificação da matriz energética, a mitigação das emissões e a promoção da economia circular.

Quadro 12 – Projeções das emissões de GEE provenientes de fonte estacionária associada à usina termelétrica em Santa Catarina, expressas em tCO₂e, para os anos de 2030, 2040 e 2050, considerando cenários de substituição progressiva de combustível fóssil por biocombustível

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					Cenário 2 2030	Cenário 3 2040	Cenário 4 2050
1	Capivari de Baixo	Carvão CE-4500 kcal/kg	3.347.151,8	Biogás	3.195.292	3.119.911	2.969.147

Fonte: Autor, 2023

No tocante às fontes estacionárias, Geng, Wang e Leisheng (2020) analisaram o uso de fatores de emissão em indústrias e usinas, abordando os métodos aplicados em inventários nacionais de GEE. Esses estudos internacionais fornecem uma base metodológica sólida e comparável ao contexto catarinense.

4.1.2 Emissões de GEE diretas de fontes móveis rodoviárias

No contexto das emissões atmosféricas associadas ao setor de transportes, a estimativa total das emissões provenientes de fontes móveis rodoviárias no estado de Santa Catarina, no ano de 2022, atingiu 20.367.486,64 tCO₂e (Figura 9). Esse quantitativo está diretamente associado às atividades de transporte de passageiros e cargas, marcadas pelo tráfego intenso e frequentes congestionamentos, o que

evidencia a elevada dependência de combustíveis fósseis como principal fonte de energia no setor. Tal cenário reflete a predominância de matrizes energéticas com alto potencial poluidor, típicas de setores com relevante contribuição para o agravamento dos impactos ambientais e das mudanças climáticas.

O quadro 13 mostra resultados referentes às emissões de gases de efeito estufa (GEE) e poluentes atmosféricos provenientes de fontes móveis rodoviárias no estado de Santa Catarina, correspondentes ao cenário 1, do ano de 2022. Já as projeções de mitigação dessas emissões nos cenários futuros: cenário 2, do ano de 2030 (quadro 14), cenário 3, do ano de 2040 (quadro 15) e cenário 4, do ano de 2050 (quadro 16), que consideram a substituição progressiva dos combustíveis fósseis por biocombustíveis, conforme as proporções definidas para cada horizonte temporal. Os dados estão organizados por tipo de veículo e combustível, apresentando a fração relativa de participação de cada categoria na frota, bem como os volumes emitidos de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), todos expressos em toneladas.

Quadro 13 – Emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, conforme cenário 1, ano 2022.

Emissões – 2022					
Veículos	Fração	tCO ₂ e (t)	CO (t)	CO ₂ (t)	CH ₄ (t)
Automóvel Gasolina	0,240	3.202.549,79	2.356,68	3.096.874,32	993,17
Automóvel Álcool	0,021	364.208,38	1.160,02	360.705,88	95,09
Automóvel Flex (30% etanol e 70% gasolina)	0,418	5.645.402,30	14.446,25	5.498.062,80	1.669,08
Caminhões	0,041	6.621.109,58	1.904,66	6.525.251,20	398,30
Onibus Urbano	0,005	2.085.798,21	646,72	2.055.600,67	125,47
Onibus Rodoviários	0,001	318.591,54	63,99	313.979,07	19,17
Táxi (30% etanol e 70% gasolina)	0,005	264.389,95	676,56	257.489,63	78,17
Motocicletas Gasolina	0,170	473.079,01	5.353,85	457.468,68	146,71
Motocicletas flex (30% Etanol e 70% Gasolina)	0,055	151.259,26	1.987,53	147.265,06	44,82
Caminhonete Diesel	0,035	1.241.098,62	1.216,30	1.223.130,38	74,66
Total	1,000	20.367.486,64			

Fonte: Autor, 2024.

Quadro 14 – Projeções das emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, conforme cenário 2, ano 2030.

Emissões – 2030				
Veículos	CO ₂ e (t)	CO (t)	CO ₂ (t)	CH ₄ (t)
Automóvel Gasolina	3.145.907,39	2.336,78	3.070.727,57	915,57
Automóvel Álcool	364.208,38	1.160,02	360.705,88	95,09
Automóvel Flex (30% etanol e 70% gasolina)	5.575.013,55	14.360,88	5.465.570,85	1.572,65
Caminhões	6.441.205,27	1.859,05	6.368.996,44	573,69
Ônibus Urbano	2.029.124,32	638,39	2.006.376,00	180,73
Ônibus Rodoviários	309.934,98	63,17	306.460,47	27,60
Táxi (30% etanol e 70% gasolina)	261.093,45	672,56	255.967,93	73,65
Motocicletas Gasolina	456.593,18	5.214,55	445.565,73	133,13
Motocicletas flex (30% Etanol e 70% Gasolina)	147.474,10	1.950,65	144.532,13	41,70
Caminhonete Diesel	1.207.376,33	1.187,17	1.193.841,09	107,54
Total	19.937.930,95			

Fonte: Autor, 2024.

Quadro 15 – Projeções das emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, conforme cenário 3, ano 2040.

Emissões – 2040				
Veículos	CO ₂ e (t)	CO (t)	CO ₂ (t)	CH ₄ (t)
Automóvel Gasolina	3.117.586,19	2.326,83	3.057.654,20	876,77
Automóvel Álcool	364.208,38	1.160,02	360.705,88	95,09
Automóvel Flex (30% etanol e 70% gasolina)	5.539.819,18	14.318,19	5.449.324,47	1.524,43
Caminhões	6.351.253,12	1.836,25	6.290.869,06	661,39
Onibus Urbano	2.000.787,37	629,47	1.981.765,03	208,36
Onibus Rodoviários	305.606,71	62,29	302.701,18	31,82
Táxi (30% etanol e 70% gasolina)	259.445,20	670,56	255.207,08	71,39
Motocicletas Gasolina	448.350,27	5.144,89	439.614,26	126,34
Motocicletas flex (30% Etanol e 70% Gasolina)	145.581,52	1.932,20	143.165,66	40,14
Caminhonete Diesel	1.190.515,18	1.172,61	1.179.196,45	123,97
Total	19.723.153,12			

Fonte: Autor, 2024.

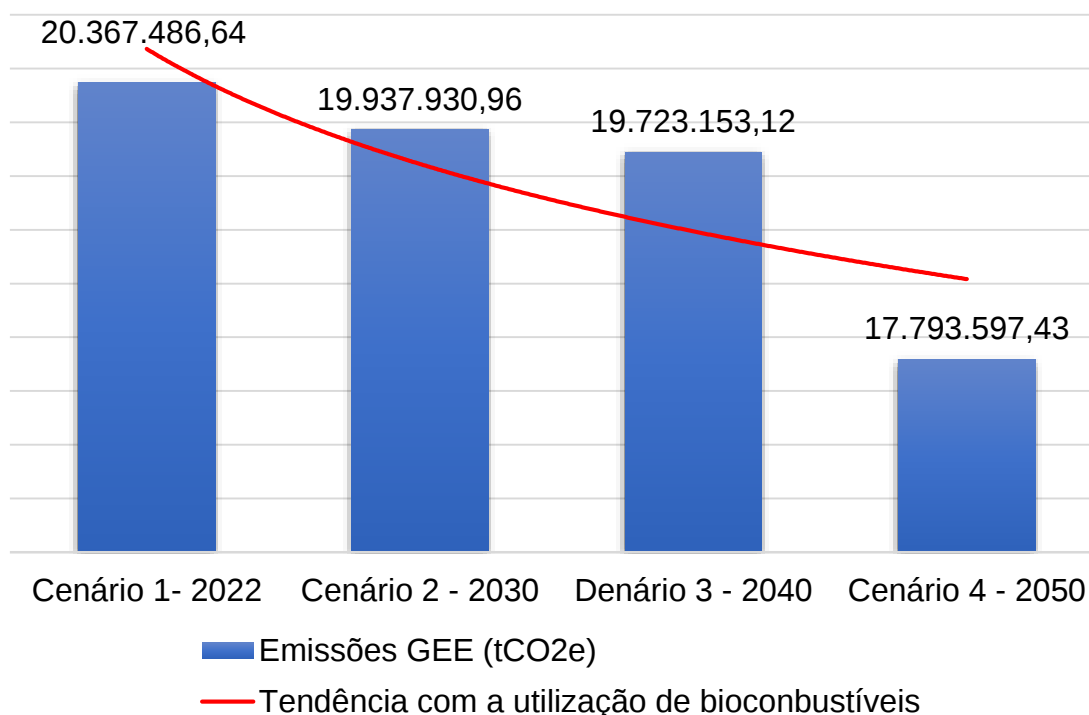
Quadro 16 – Projeções das emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, conforme cenário 4, ano 2050.

Emissões – 2050				
-----------------	--	--	--	--

Veículos	CO ₂ e (t)	CO (t)	CO ₂ (t)	CH ₄ (t)
Automóvel Gasolina	3.060.943,79	2.306,93	3.031.507,45	799,18
Automóvel Álcool	364.208,38	1.160,02	360.705,88	95,09
Automóvel Flex (30% etanol e 70% gasolina)	5.469.430,43	14.232,82	5.416.832,25	1.428,00
Caminhões	4.671.348,81	1.352,80	4.634.614,30	836,78
Onibus Urbano	1.944.113,47	611,64	1.932.541,28	263,60
Onibus Rodoviários	296.950,15	60,52	295.182,58	40,26
Táxi (30% etanol e 70% gasolina)	256.148,69	666,56	253.685,37	66,88
Motocicletas Gasolina	431.864,44	5.005,59	427.711,30	112,75
Motocicletas flex (30% Etanol e 70% Gasolina)	141.796,36	1.895,32	140.432,73	37,02
Caminhonete Diesel	1.156.792,89	1.143,48	1.149.907,17	156,85
Total	17.793.597,43			

Fonte: Autor, 2024.

Figura 9 – Projeções das emissões de GEE provenientes de fontes móveis rodoviárias em Santa Catarina, com a utilização de biocombustíveis.



Fonte: Autor, 2024.

O inventário das emissões de GEE oriundas das combustões estacionárias e móveis rodoviárias no estado de Santa Catarina, foi realizado com posterior análise metodológica dos impactos dessas emissões no contexto das variações da

temperatura global. Essa abordagem permitiu quantificar as fontes emissores regionais e compreender sua relevância no cenário climático mais amplo.

Os resultados demonstraram que as emissões antropogênicas de GEE no estado, associadas às atividades de combustão direta, têm apresentado tendência de crescimento ao longo do tempo. Esse aumento contribui de forma significativa para o agravamento do efeito estufa, refletindo-se em alterações climáticas tanto em escala regional quanto global. A intensificação dessas emissões reforça a urgência de medidas voltadas à sua contenção.

Zhang e Farooq (2022) propuseram um modelo preditivo para emissões veiculares em segmentos viários específicos (road link), utilizando técnicas econométricas e evidenciando a relevância da granularidade na formulação de políticas públicas urbanas de mitigação. Já Vagdatli e Petroutsatou (2022), ao avaliarem projetos de transporte sob a ótica ambiental, distinguem entre emissões diretas (tank-to-wheel) e indiretas (well-to-tank), o que reforça a importância de se considerar as emissões de fontes móveis rodoviárias diretas.

Diante desse panorama, evidencia-se a imperatividade de implementar estratégias eficazes de mitigação das emissões, as quais devem priorizar a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis e a transição de matrizes energéticas intensivas em carbono para fontes mais limpas e renováveis no estado de Santa Catarina.

4.2 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA

Com base na aplicação da metodologia do Programa Brasileiro GHG Protocol, foi elaborado o inventário das emissões de GEE no estado de Santa Catarina para o ano de 2022 de fontes estacionárias e móveis rodoviárias. Os resultados obtidos revelam que as fontes móveis rodoviárias, associadas principalmente ao transporte de passageiros e cargas por veículos automotores foram responsáveis pela emissão de aproximadamente 20.367.486,64 tCO₂e. Em complemento, as fontes estacionárias, compreendidas pelas atividades industriais classificadas como GPP, bem como pela usina termelétrica em operação no estado, contribuíram com a emissão de 4.298.122,84 tCO₂e no mesmo período.

A soma das emissões provenientes dessas duas fontes, estacionárias e móveis rodoviárias, resultou em um total de 24.665.609,48 tCO₂e, conforme demonstrado no Quadro 17. Esses valores indicam a significativa contribuição das atividades de transporte e do setor industrial para o balanço estadual de emissões de GEE, evidenciando a necessidade de estratégias específicas de mitigação que considerem tanto a modernização da frota veicular quanto a transição energética no setor produtivo.

Quadro 17 - Inventário das emissões de Santa Catarina no ano de 2022, com utilização do Programa Brasileiro GHG Protocol.

Estado	Emissões Estacionárias	Emissões Móveis Rodoviárias	Emissões Totais
Santa Catarina	4.298.122,84 tCO ₂ e	20.367.486,64 tCO ₂ e	24.665.609,48 tCO ₂ e

Fonte: Autor, 2024.

Os resultados obtidos a partir do inventário de emissões de GEE no estado de Santa Catarina revelam um panorama significativo de emissões atribuídas tanto a fontes móveis rodoviárias, quanto estacionárias.

Com o objetivo de avaliar o potencial de mitigação dessas emissões, foram desenvolvidos cenários projetivos de substituição gradual de combustíveis fósseis por biocombustíveis, considerando os anos de 2030, 2040 e 2050. Sintetiza-se os percentuais de redução estimados para cada cenário (quadro 18), em função da alteração nas proporções de combustíveis utilizados.

Então, foram elaborados cenários projetivos que consideraram a substituição parcial de combustíveis fósseis por biocombustíveis, como alternativa viável para a mitigação das emissões. As projeções indicam que a implementação gradual da transição energética resultaria em reduções significativas das emissões totais: 2,44% até 2030 (com 40% de biocombustível), 3,66% até 2040 (com 60% de biocombustível) e 12,18% até 2050 (com 100% de biocombustível). Essa transição prevê a substituição para etanol e biodiesel no caso das fontes móveis rodoviárias, e para biogás, eletricidade e etanol para as fontes estacionárias. Tais estimativas baseiam-se em estudos realizados conforme a metodologia do GHG Protocol.

Esses resultados, embora ainda modestos nos primeiros períodos, revelam um potencial mitigador expressivo no longo prazo, especialmente se articulados com

políticas públicas consistentes e incentivos à adoção de tecnologias de menor impacto ambiental.

Quadro 18 - Redução das emissões de CO_{2e}, conforme cenários pré-estabelecidos, alterando a proporção de combustíveis e biocombustíveis para fontes estacionárias e móveis rodoviárias

	Cenário 2 (2030)	Cenário 3 (2040)	Cenário 4 (2050)
Proporção de biocombustível	40%	60%	100%
Redução das emissões	2,44%	3,66%	12,18%
Redução das Emissões (tCO _{2e})	24.063.101,95	23.762.397,11	21.660.985,42

Fonte: Autor, 2023

No entanto, os resultados apresentados evidenciam que a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável não apenas é possível, como necessária, sendo os biocombustíveis uma alternativa estratégica no contexto brasileiro, dada sua disponibilidade e legislação vigente que já incorpora percentuais obrigatórios na mistura com combustíveis fósseis.

No cenário internacional, Sentek *et al.* (2023) desenvolveram um inventário espacial detalhado de emissões de GEE na Polônia, abrangendo fontes estacionárias, móveis e processos industriais. O estudo destaca a importância de dados georreferenciados para a compreensão da dinâmica regional das emissões. De modo complementar no estudo de Heathfield *et al.* (2020), fatores de emissão de CH₄ e N₂O são apresentados para veículos leves e pesados, ressaltando os impactos das emissões veiculares nas mudanças climáticas.

Portanto, este estudo reforça a importância de medidas integradas entre o setor público, privado e a sociedade civil, com foco na reestruturação da matriz energética e na adoção de práticas mais sustentáveis, visando a redução efetiva das emissões e a promoção do desenvolvimento ambientalmente responsável no estado de Santa Catarina.

4.3 ESTIMATIVA DOS IMPACTOS DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DAS COMBUSTÕES ESTACIONÁRIAS E MÓVEIS RODOVIÁRIAS DE SANTA CATARINA NO AQUECIMENTO GLOBAL.

A partir do modelo de cálculo de Ellis (2013), aplicado aos diferentes cenários prospectivos projetados para os anos de 2030, 2040 e 2050, os resultados revelam uma tendência de redução gradual nas emissões totais de GEE em Santa Catarina (quadro 19), considerando a substituição progressiva de combustíveis fósseis por biocombustíveis. Tomando como referência o cenário base de 2022, que apresenta emissões totais de 24.665.609,44 tCO₂e, observa-se uma diminuição para 24.063.101,95 tCO₂e em 2030 (Cenário 2), 23.762.397,12 tCO₂e em 2040 (Cenário 3), e uma redução mais expressiva para 21.660.985,43 tCO₂e em 2050 (Cenário 4).

Do ponto de vista das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), ainda que as variações sejam numericamente sutis, é possível identificar uma leve queda nos valores, passando de 415 ppm em 2022 para 414,9699 ppm em 2050 (quadro 19). E especificamente, para Santa Catarina, passando de 417,9 ppm (NASA, 2023) em 2022 para 417,86969 ppm em 2050 (quadro 19). Essa alteração, embora pequena, representa o efeito acumulado de políticas de mitigação ao longo das décadas.

Além disso, os resultados indicam impactos discretos, porém mensuráveis, na temperatura média global estimada. A partir do valor da temperatura média global de 15°C em 2022, projeta-se uma redução de até 0,000052°C até 2050 (quadro 19), conforme os dados do Cenário 4. E, especificamente, para o estado de Santa Catarina, o valor da temperatura média de 19°C em 2022, projeta-se uma redução de até 0,0000661°C até 2050 (quadro 19). Essa variação, apesar de aparentemente insignificante em termos absolutos, refere-se somente ao estado de Santa Catarina, reforça a complexidade da relação entre emissões regionais e efeitos climáticos globais, e evidencia a necessidade de ações coordenadas em escala planetária para alcançar resultados mais expressivos.

Quadro 19 - Estimativa dos impactos das reduções de emissões de GEE provenientes das combustões móveis rodoviárias de Santa Catarina, sobre o aquecimento global.

Cálculo de Ellis	Cenário 1 2022 tCO ₂ e	Cenário 2 2030 tCO ₂ e	Cenário 3 2040 tCO ₂ e	Cenário 4 2050 tCO ₂ e
Emissões Totais (tCO ₂ e)	24.665.609,44	24.063.101,95	23.762.397,12	21.660.985,43
Concentrações (CO ₂) Global	415 ppm	414,9940 ppm	414,9909 ppm	414,9699 ppm
Temperatura Média Global	15°C	14,99998953°C	14,99998431°C	14,99994780°C
Redução na Temperatura Média Global		0,000010°C	0,000016°C	0,000052°C
Concentrações (CO ₂) Santa Catarina	417,9 ppm	417,893958 ppm	417,890836 ppm	417,86969 ppm
Temperatura Média Santa Catarina	19°C	18,9999867°C	18,9999801°C	18,9999339°C
Redução na Temperatura Média de Santa Catarina		0,0000133°C	0,0000199°C	0,0000661°C

Fonte: Autor, 2025

Assim, os dados obtidos apontam que, embora as políticas de transição energética em Santa Catarina contribuam positivamente para a mitigação das emissões de GEE, seus reflexos diretos na temperatura global são limitados sem o engajamento conjunto de outras regiões e países emissores. A continuidade e o aprofundamento dessas políticas, especialmente nas fontes móveis rodoviárias e estacionárias, são fundamentais para que o estado avance na sua contribuição à agenda climática internacional.

4.4 MODELAGEM E SIMULAÇÕES GEOESPACIAIS DAS CONCENTRAÇÕES DE GEE

As simulações realizadas por meio do modelo numérico WRF-Chem, ferramenta amplamente utilizada para modelagem atmosférica e análise geoespacial de poluentes, possibilitaram a geração de mapas (Figuras 10 a 18) de emissão e concentração do monóxido de carbono (CO) e dos GEE, tais como, dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), considerando o último dia de simulação como base, ou seja, 14 de julho de 2022, para o estado de Santa Catarina. As projeções abrangeram a aplicação de cenários de mitigação para os anos de 2030, 2040 e 2050. Esses cenários foram caracterizados pela substituição gradativa de combustíveis fósseis por biocombustíveis nas seguintes proporções: 40% (Cenário 2), 60% (Cenário 3) e 100% (Cenário 4), respectivamente.

O estudo incluiu a geração de mapas de emissões horárias e concentrações, além de dados de diferença em relação ao ano base de 2022. Essa abrangência metodológica permitiu avaliar detalhadamente a evolução das emissões antropogênicas sob os distintos cenários de mitigação propostos.

As Figuras 10 a 12 ilustram os cenários projetivos de emissão de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), respectivamente, para o estado de Santa Catarina. Os dados são apresentados desde o cenário atual (2022) até o ano de 2050, expressos em partes por bilhão por volume (ppbv). As colunas dessas figuras representam os diferentes cenários temporais, enquanto as linhas exibem as emissões em seis intervalos horários específicos ao longo do dia (22h, 04h, 08h, 12h, 16h e 20h). Essa organização horária é fundamental para analisar a variabilidade diurna das emissões, uma vez que reflete as distintas dinâmicas operacionais das fontes estacionárias e os padrões de tráfego das fontes móveis rodoviárias em um ciclo de 24 horas.

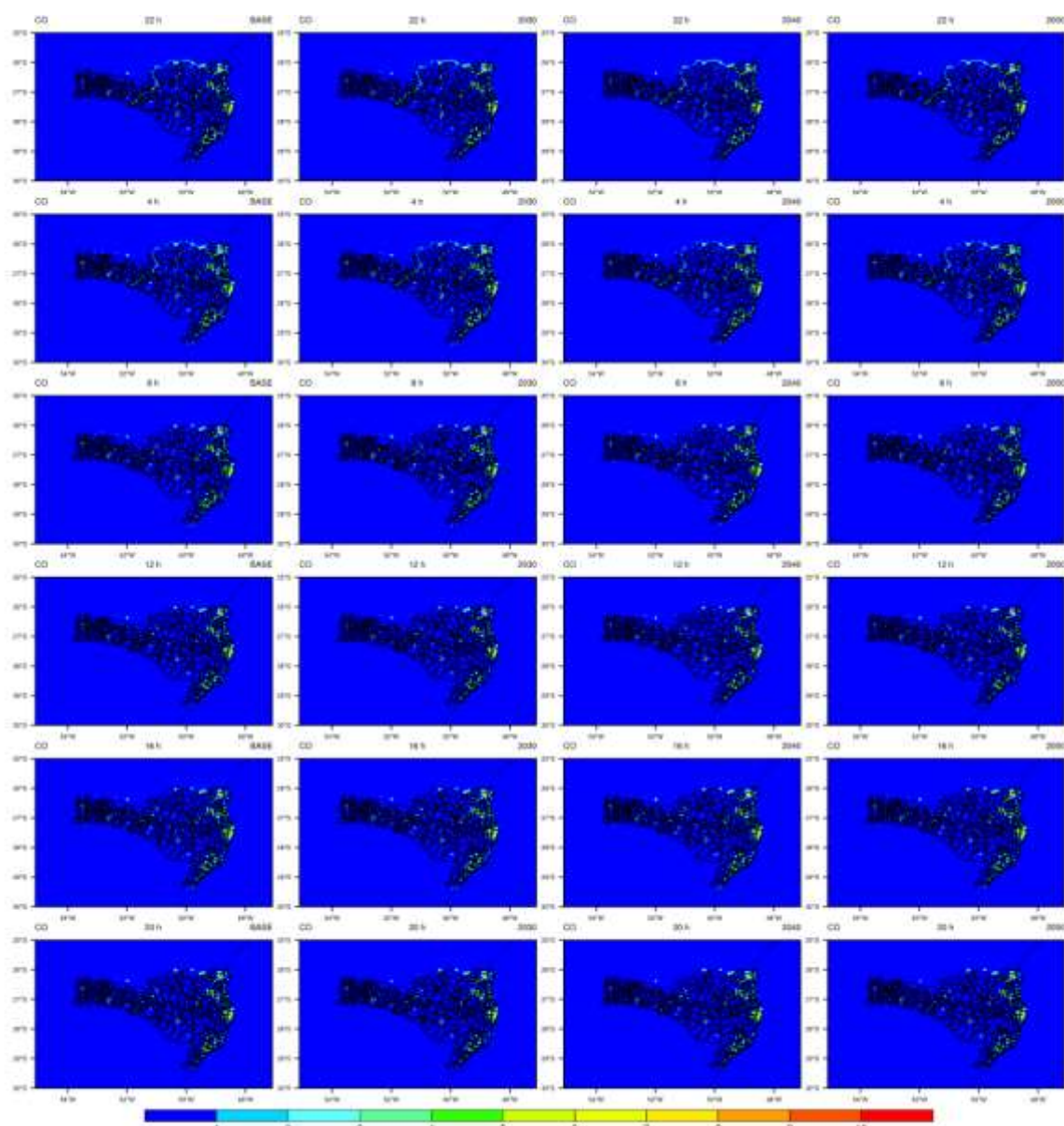
De modo geral, as emissões de CO, CO₂ e CH₄ exibem um padrão espacial consistentemente correlacionado com as densidades populacionais e de atividades antropogênicas. As maiores emissões são predominantemente localizadas em áreas urbanas e densamente povoadas, particularmente ao longo da faixa costeira e nas regiões metropolitanas do estado, onde a densidade de fontes emissoras, como veículos e indústrias, é mais elevada. Em contraste, as regiões do interior do estado mantêm emissões consistentemente mais baixas. Temporalmente, as maiores

emissões tendem a ocorrer nos horários de pico de atividade (8h e 16h), que historicamente se correlacionam com períodos de maior funcionamento industrial e deslocamento urbano.

A análise comparativa entre o cenário base e os cenários projetivos revela uma redução geral nas emissões dos três gases ao longo das décadas, o que é atribuído à substituição progressiva de combustíveis fósseis por biocombustíveis.

A Figura 10 detalha a análise da evolução espacial e temporal das emissões de CO sobre o estado de Santa Catarina, expressos em partes por bilhão por volume (ppbv). Os resultados confirmam a consistência dos padrões de emissão em todos os cenários, com picos nos horários de maior atividade. A distribuição espacial das emissões de CO demonstra uma clara correlação com as densidades populacionais e de atividades antropogênicas, sendo predominantemente localizadas em áreas urbanas e densamente povoadas, especialmente ao longo da faixa costeira e nas regiões metropolitanas. A partir dos dados apresentados, conclui-se que a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis levará a uma redução significativa nas emissões de monóxido de carbono em Santa Catarina nas próximas décadas, particularmente evidente nas áreas mais urbanizadas e durante os horários de pico de atividades.

Figura 10 - Distribuição espacial das emissões horárias de monóxido de carbono (CO) simuladas com o modelo WRF-Chem para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050 no estado de Santa Catarina, no dia 14 de julho de 2022.

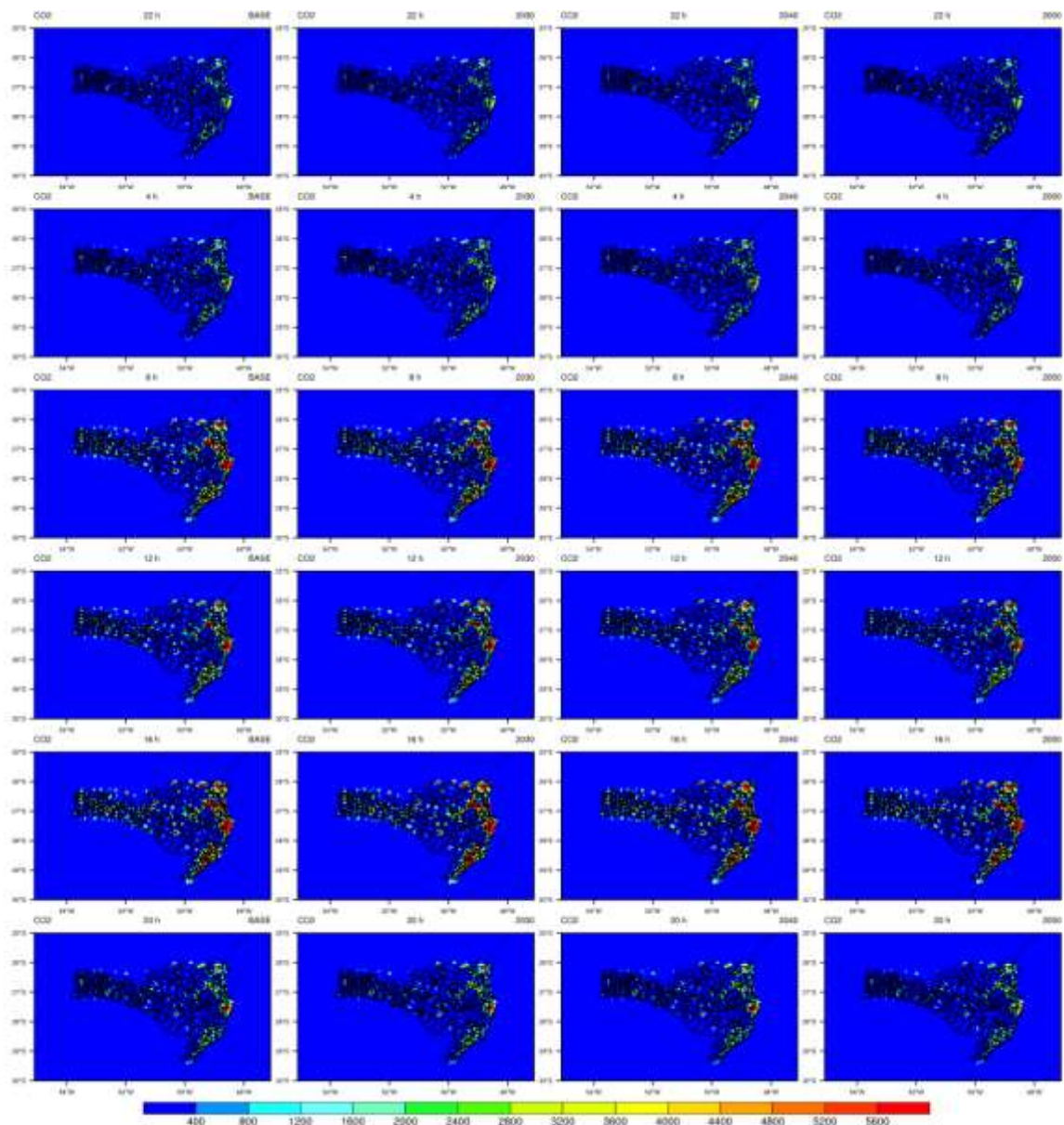


Fonte: Autor, 2025.

A Figura 11 ilustra a evolução espacial e temporal das emissões de dióxido de carbono (CO_2) sobre o estado de Santa Catarina, expressos em partes por bilhão por volume (ppbv). Observa-se que as emissões de CO_2 apresentam uma redução com o passar das décadas em todos os cenários. As maiores emissões tendem a ser observadas nos horários de pico de atividade (8h e 16h), que correspondem a períodos de maior tráfego veicular e atividades industriais. A distribuição espacial das emissões de CO_2 demonstra uma clara correlação com a densidade das fontes estacionárias e móveis rodoviárias, provenientes das atividades antropogênicas, predominando nas áreas urbanas e densamente povoadas, especialmente ao longo

da costa e nas regiões metropolitanas do estado. Essa tendência de redução das emissões máximas nos cenários projetivos confirma que a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis contribui para mitigar as emissões. Essa contribuição é corroborada pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), que projeta uma expansão da demanda por biocombustíveis, resultando em uma economia significativa nas emissões anuais de dióxido de carbono quando comparada ao uso contínuo de combustíveis fósseis (ACS Publications, 2022).

Figura 11 - Distribuição espacial das emissões horárias de dióxido de carbono (CO_2) simuladas com o modelo WRF-Chem para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050 no estado de Santa Catarina, no dia 14 de julho de 2022.

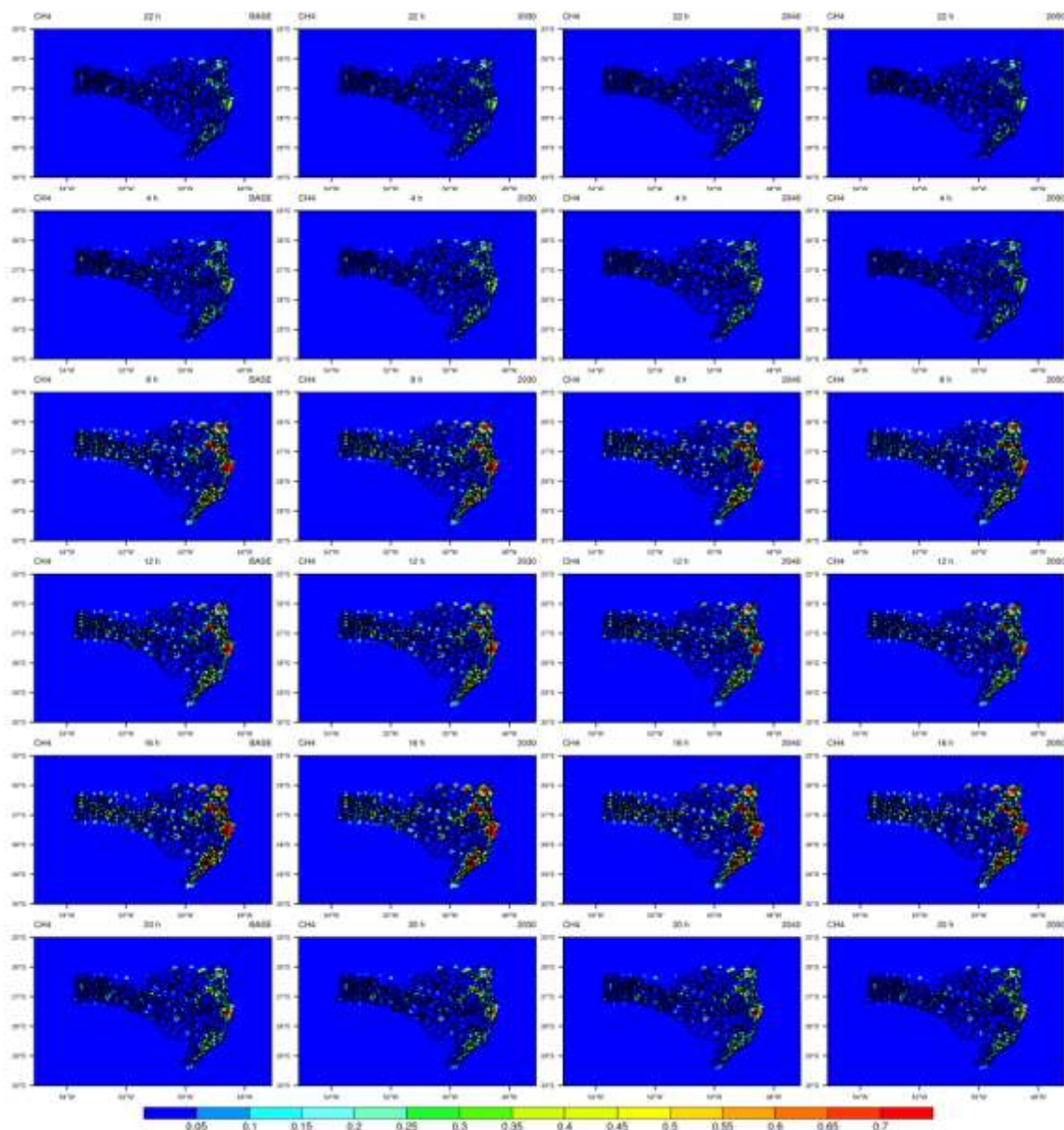


Fonte: Autor, 2025.

A Figura 12 apresenta a análise das emissões de metano (CH_4) sobre o estado de Santa Catarina, expressos em partes por bilhão por volume (ppbv). A distribuição espacial das emissões de CH_4 mostra que as maiores emissões estão localizadas nas áreas urbanas e densamente povoadas, especialmente ao longo da costa e nas regiões metropolitanas do estado. Em relação à tendência temporal, a comparação entre o cenário base e os cenários futuros revela uma redução nas emissões de CH_4 com o passar das décadas em todos os cenários. As maiores emissões tendem a ser observadas nos horários de pico de atividade das fontes estacionárias e móveis rodoviárias (8h e 16h), que correspondem a períodos de maior tráfego veicular e atividades industriais. Essa análise reforça a importância do monitoramento contínuo e do uso de ferramentas de modelagem da qualidade do ar para subsidiar decisões estratégicas de planejamento urbano e ambiental, com foco na mitigação das emissões de GEE e na adaptação às mudanças climáticas.

A abordagem metodológica e os focos de análise adotados neste estudo encontram respaldo em pesquisas realizadas em outras regiões, como nos Emirados Árabes Unidos (EAU). Nessas localidades, as emissões atmosféricas oriundas de atividades industriais e do tráfego veicular, que dependem em grande parte da combustão de combustíveis fósseis (Teixido *et al.*, 2021; Shahbaz *et al.*, 2014). Corroborando esta preocupação, o tráfego intenso em áreas urbanas é amplamente reconhecido como um contribuinte significativo para níveis elevados de gases poluentes troposféricos (Abuelgasim; Farahat, 2020; Li *et al.*, 2010). Consequentemente, a literatura aponta que a integração de modelos de transporte químico com observações de resolução temporal, como as horárias, é fundamental para aprimorar substancialmente a compreensão das dinâmicas de emissão, distribuição, transporte e transformação de poluentes em regiões-alvo (Eltahan *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Yarragunta *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2021). Essa consonância metodológica reforça a validade da estratégia empregada nesta pesquisa.

Figura 12 - Distribuição espacial das emissões horárias de metano (CH_4) simuladas com o modelo WRF-Chem para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050 no estado de Santa Catarina, no dia 14 de julho de 2022.



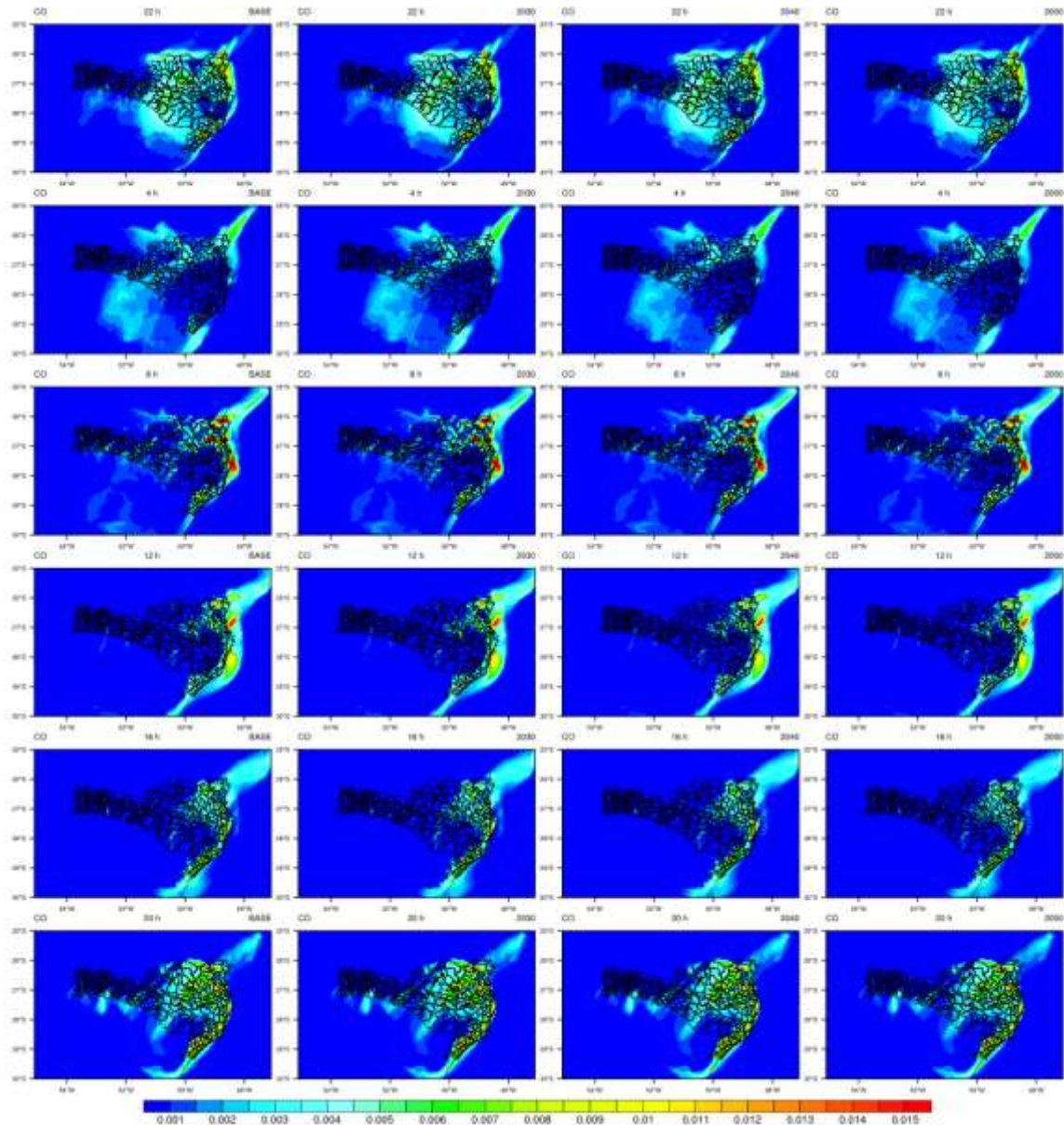
Fonte: Autor, 2025.

As Figuras 13 a 15 apresentam os cenários projetivos de concentração de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), respectivamente, no estado de Santa Catarina. Nessas representações, as concentrações são expressas em partes por bilhão por volume (ppbv) para o período simulado até o ano de 2050. As colunas ilustram os diferentes anos dos cenários, enquanto as linhas exibem as concentrações em seis intervalos horários específicos

ao longo do dia (22h, 04h, 08h, 12h, 16h e 20h). Essa granularidade horária é fundamental para analisar a variabilidade diurna das concentrações, pois reflete as distintas dinâmicas operacionais das fontes estacionárias e os padrões de tráfego das fontes móveis rodoviárias em um ciclo de 24 horas.

A Figura 13 detalha a distribuição espacial das concentrações de monóxido de carbono (CO) no estado de Santa Catarina, expressos em partes por bilhão por volume (ppbv), considerando diferentes faixas horárias. Os resultados confirmam padrões temporais e espaciais distintos de emissão de CO, com picos concentrados nas primeiras horas da manhã e no início da tarde. As áreas urbanizadas e os principais corredores viários, como as regiões metropolitanas e os eixos litorâneos, concentram os maiores fluxos de concentração, refletindo a influência direta das indústrias e do tráfego veicular como fontes emissoras. A análise detalhada da distribuição espaço-temporal das concentrações de CO nos cenários projetivos reforça a importância de estratégias de mitigação direcionadas aos horários e regiões mais críticos. Tais estratégias devem englobar, de forma prioritária, o uso de biocombustíveis em substituição aos combustíveis fósseis, o que contribuirá significativamente para a redução das concentrações de CO.

Figura 13 - Distribuição espacial das concentrações horárias de monóxido de carbono (CO) simuladas com o modelo WRF-Chem no estado de Santa Catarina, para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050, no dia 14 de julho de 2022.



Fonte: Autor, 2025.

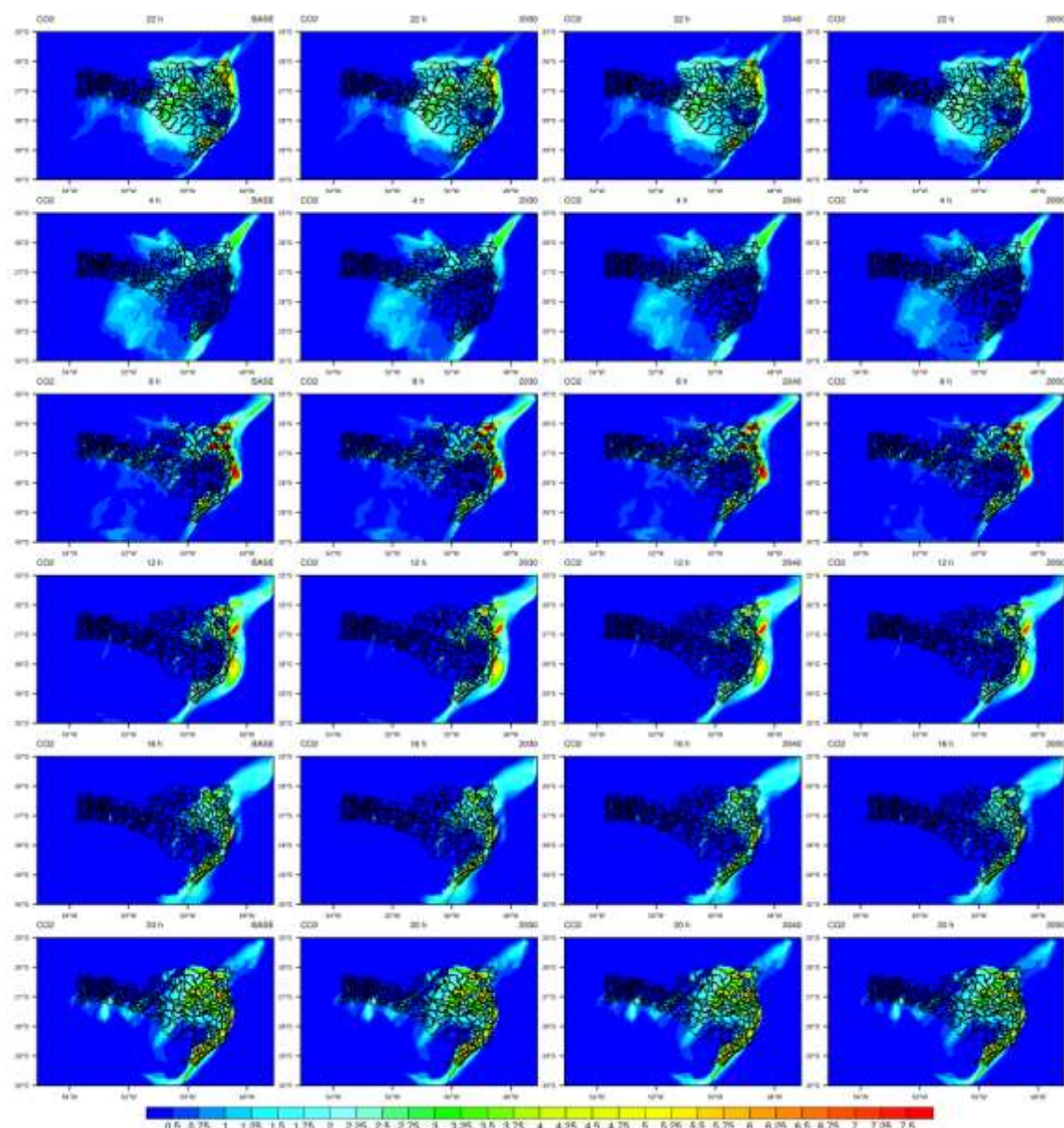
A Figura 14 apresenta a distribuição espacial das concentrações de dióxido de carbono (CO_2) no estado de Santa Catarina, expressos em partes por bilhão por volume (ppbv), obtidas por meio de simulações realizadas com o modelo acoplado WRF-Chem. Os resultados indicam picos de emissão, especialmente às 08h e às 20h, com maior intensidade nas áreas urbanizadas e nas regiões litorâneas do estado. O pico de emissão as 8h corresponde ao horário de maior emissão em função da

produção industrial e da movimentação de veículos nas rodovias. Já o pico das 20h pode ser justificado pelo comportamento da Camada Limite Atmosférica. Conforme Arellano *et al.* (2015), durante o dia, a superfície terrestre absorve a radiação solar, aquecendo-se e transferindo calor para o ar adjacente por condução, seguido de um processo de convecção e dispersão dos GEE. O ar aquecido torna-se menos denso e ascende, gerando correntes de ar ascendentes. Essa intensa atividade convectiva culmina na formação da Camada Limite Convectiva, caracterizada por alta turbulência devido aos movimentos caóticos do ar que promovem a mistura vertical de calor, umidade e poluentes. A Camada Limite Convectiva pode atingir alturas significativas, frequentemente entre 1 a 2 quilômetros, com seu desenvolvimento máximo ocorrendo geralmente no meio da tarde (Arellano et al., 2015).

Com o pôr do sol, a dinâmica da Camada Limite se altera drasticamente. A superfície terrestre irradia calor rapidamente para o espaço, resultando em seu resfriamento mais acelerado do que o ar. Isso induz o resfriamento da camada de ar próxima ao solo por contato, levando à formação da Camada Limite Noturna. Sua extensão varia de algumas centenas de metros a poucos quilômetros acima da superfície, sendo diretamente influenciada pelas interações dinâmicas de energia, calor, umidade e momento entre o solo e o ar (Walallce and Hobbs, 2006). Esta camada é notadamente estável, pois o ar frio e denso permanece próximo à superfície, aprisionado sob o ar mais quente e leve que se encontra acima. Uma característica distintiva da Camada Limite Noturna é a inversão térmica de superfície, onde a temperatura do ar aumenta com a altura, inibindo a ascensão do ar e a mistura vertical, justificando uma maior concentração às 20h.

As projeções futuras indicam uma tendência de redução gradual das concentrações de CO₂, o que reflete a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis. No entanto, observa-se uma redução nas concentrações máximas nos cenários projetivos, o que corrobora que a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis contribui para mitigar as emissões. Essa contribuição é reforçada pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), que projeta uma expansão da demanda por biocombustíveis, resultando em uma economia significativa nas emissões anuais de dióxido de carbono quando comparada ao uso contínuo de combustíveis fósseis (ACS Publications, 2022).

Figura 14 – Distribuição espacial das concentrações horárias de dióxido de carbono (CO_2) simuladas com o modelo WRF-Chem no estado de Santa Catarina, para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050, no dia 14 de julho de 2022.

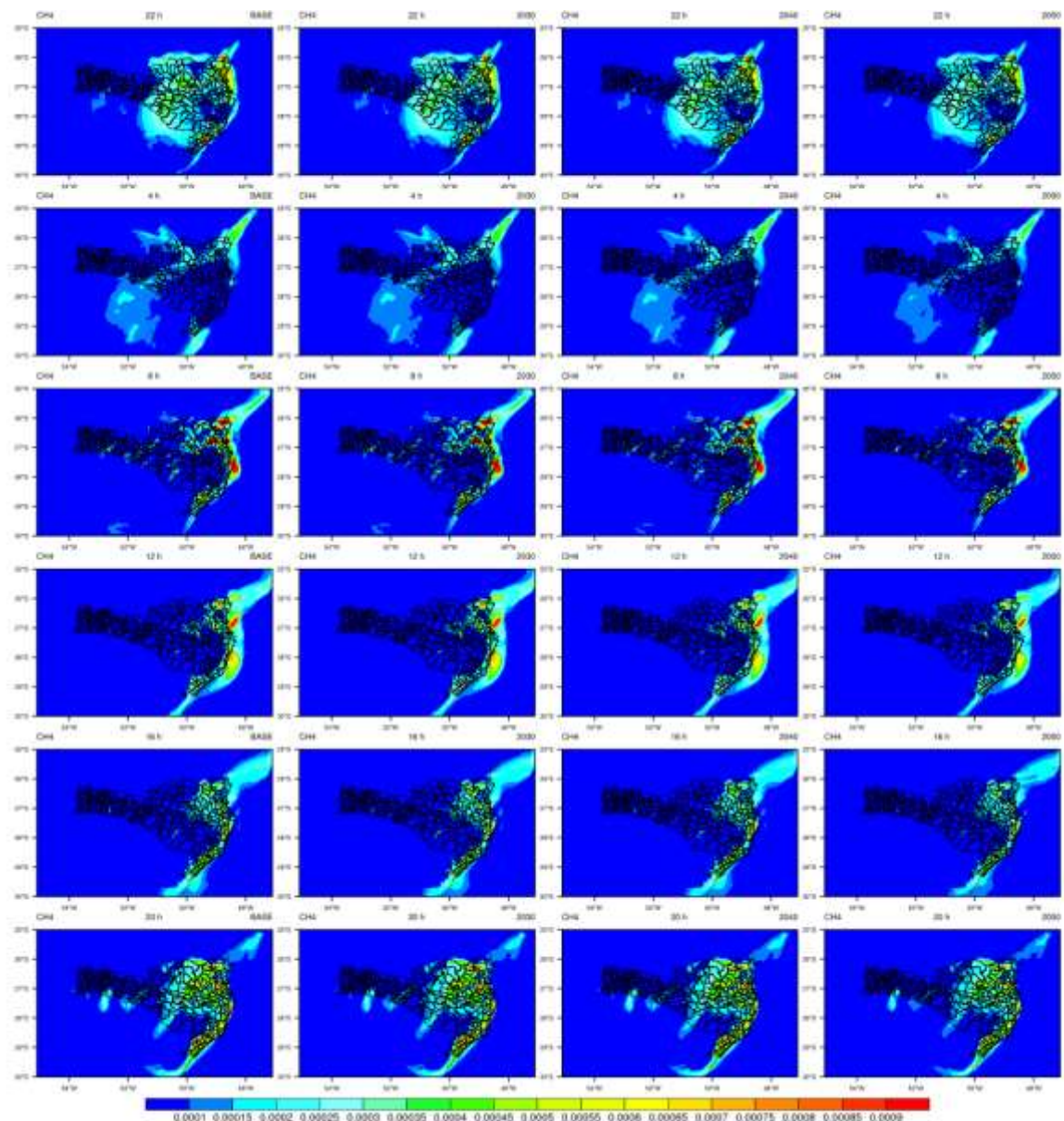


Fonte: Autor, 2025.

A Figura 15 apresenta as distribuições espaciais das concentrações horárias de metano (CH_4) no estado de Santa Catarina, expressos em partes por bilhão por volume (ppbv), simuladas por meio do modelo numérico WRF-Chem (Weather Research and Forecasting with Chemistry). As concentrações de CH_4 simuladas apresentam variações ao longo do dia e entre os diferentes anos analisados. Em 2022, as maiores concentrações ocorrem nas faixas de maior atividade das fontes estacionárias e móveis rodoviárias, principalmente às 08h e às 20h, justificadas pela

camada limite noturna, com destaque para áreas urbanizadas e regiões litorâneas. Os cenários projetivos indicam uma redução das concentrações máximas de CH_4 , especialmente nas regiões atualmente mais críticas. Essa redução está associada à substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis. Essa análise reforça a importância do monitoramento contínuo e do uso de ferramentas de modelagem da qualidade do ar para subsidiar decisões estratégicas de planejamento urbano e ambiental, com foco na mitigação das emissões de GEE e na adaptação às mudanças climáticas.

Figura 15 – Distribuição espacial das concentrações horárias de metano (CH_4) simuladas com o modelo WRF-Chem para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050 no estado de Santa Catarina, no dia 14 de julho de 2022.



Fonte: Autor, 2025

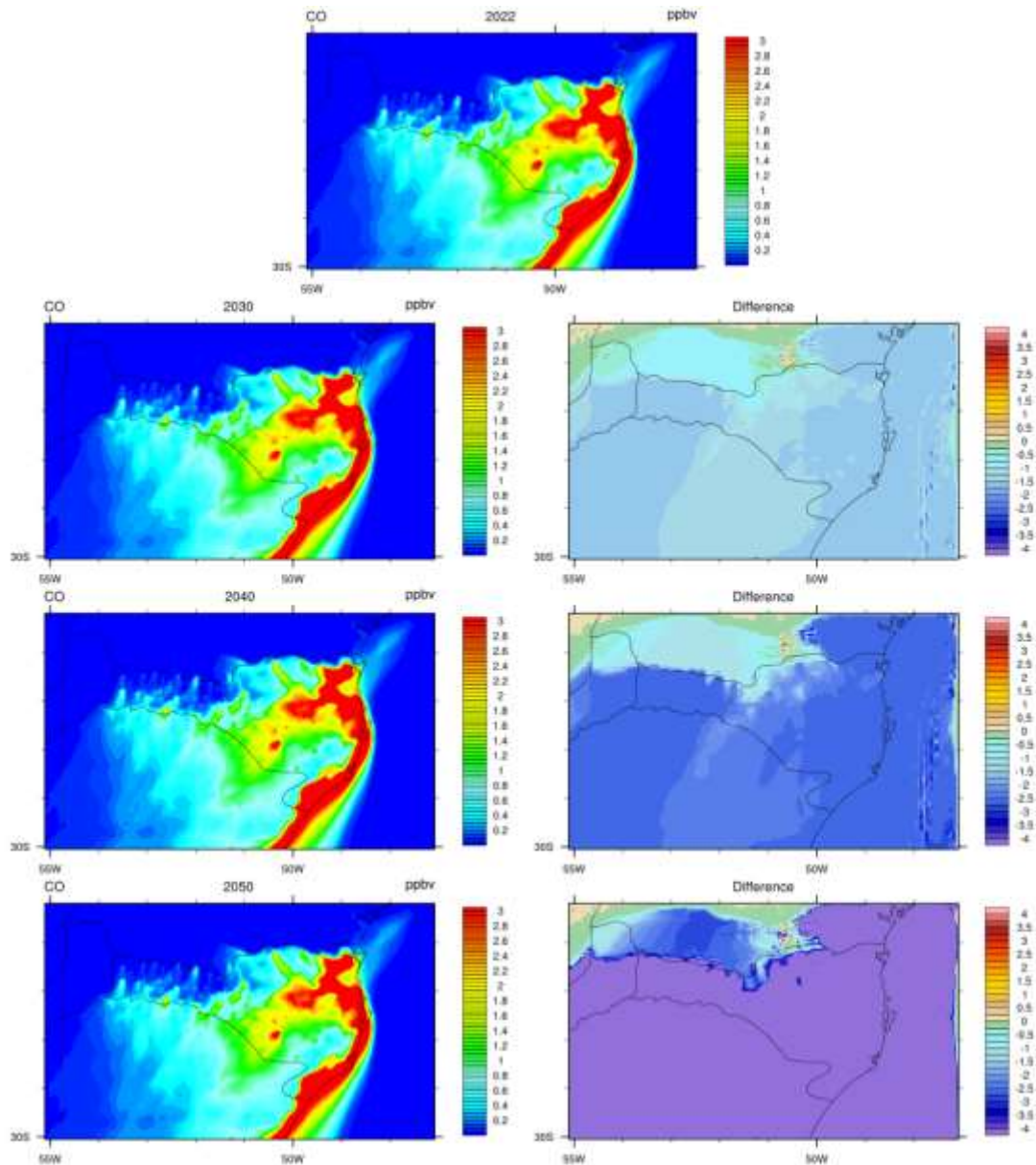
As Figuras 16 a 18 ilustram a distribuição espacial da concentração atmosférica de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), expressas em partes por bilhão por volume (ppbv), respectivamente, simuladas para o estado de Santa Catarina. Em cada figura, os mapas dispostos à esquerda representam os valores absolutos das concentrações, enquanto os mapas à direita demonstram as diferenças absolutas antropogênicas entre os cenários projetivos futuros e o ano base de 2022.

De modo geral, as simulações revelam que as maiores concentrações dos três gases se concentram predominantemente ao longo da faixa litorânea e nas regiões mais densamente urbanizadas e industrializadas do estado. Esse padrão reflete a predominância das fontes de emissões antropogênicas, notadamente aquelas associadas à queima de combustíveis fósseis em veículos automotores, processos industriais e geração termelétrica. As porções norte e nordeste do estado são consistentemente apontadas como áreas de maior concentração.

Ao analisar as diferenças projetadas com a utilização de biocombustíveis, observa-se uma tendência de redução nas concentrações para os três gases ao longo das décadas.

Para o monóxido de carbono (CO) (Figura 16), expressos em partes por bilhão por volume (ppbv), observa-se uma redução gradual nas concentrações, com destaque para o cenário de 2050, que apresenta reduções de 6 a 8%, com uma diminuição mais pronunciada nas porções oeste e leste do domínio modelado. Essa sensibilidade do CO, cujas fontes são predominantemente antropogênicas, é atribuída à sua vida média atmosférica relativamente curta (aproximadamente 1 a 2 meses), o que torna sua concentração mais responsiva a mudanças nas emissões locais e regionais. Tais resultados sugerem que a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis pode gerar reduções mensuráveis na concentração regional de CO.

Figura 16 - Projeções da Concentração Atmosférica e Diferença Percentual de Monóxido de Carbono (CO) em Santa Catarina para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050.

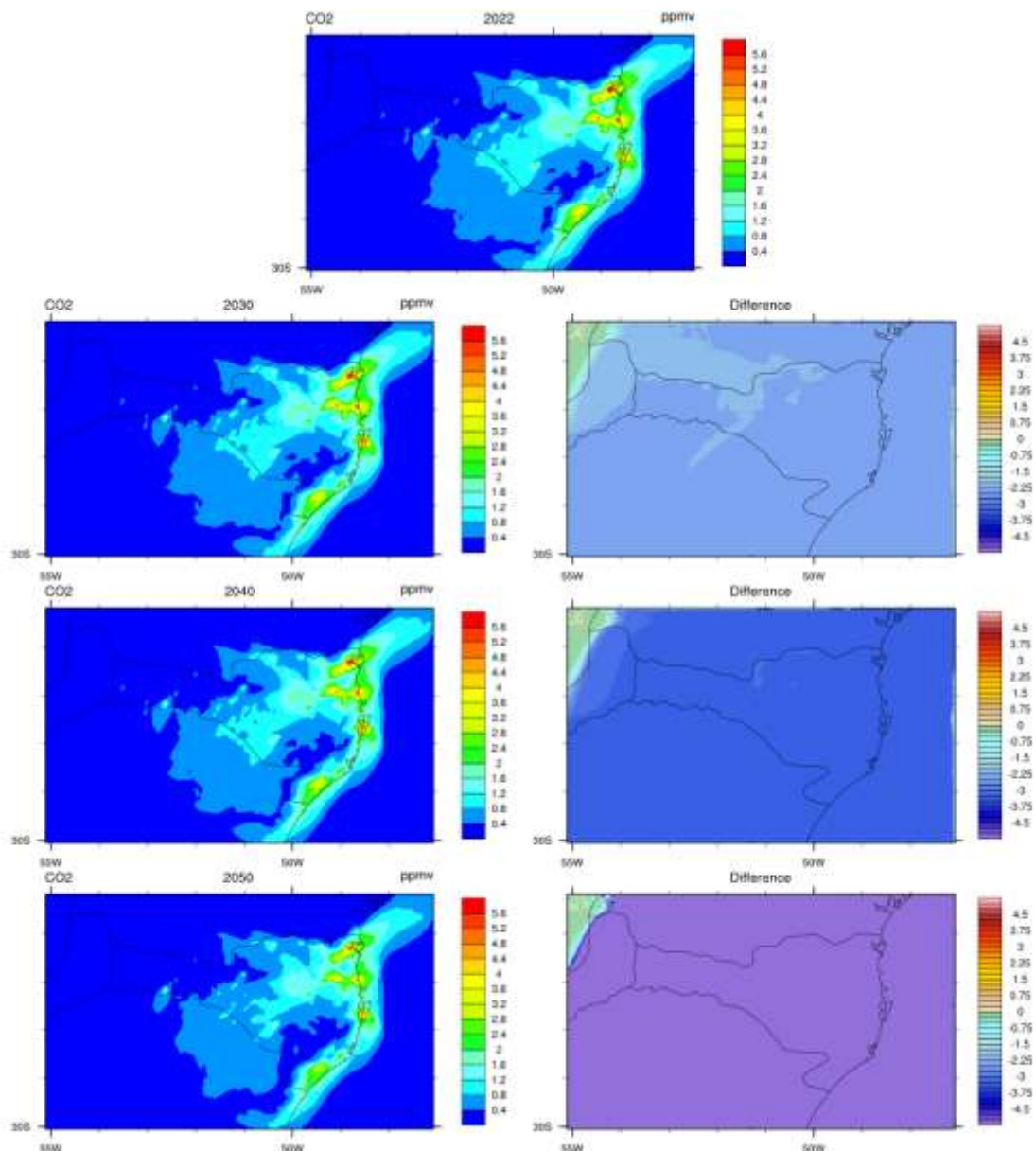


Fonte: Autor, 2025.

No caso do dióxido de carbono (CO₂) (Figura 17), expressos em partes por bilhão por volume (ppbv), embora as projeções para os cenários futuros também indiquem reduções nas concentrações em algumas regiões, na projeção para o ano de 2050 observa-se uma redução de aproximadamente 15 % na concentração de CO₂ na atmosfera do estado de Santa Catarina, devido à substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis. Sendo assim, é importante destacar um aspecto fundamental: o CO₂, por possuir uma vida média atmosférica muito longa (em escala de séculos), tende a se acumular globalmente. Isso reduz a sensibilidade de suas concentrações a mudanças locais ou regionais em escalas de tempo mais curtas.

Além disso, sua distribuição é fortemente influenciada pelas concentrações de fundo globais e pelo transporte atmosférico de longa distância, o que contribui para a homogeneização do seu sinal espacial.

Figura 17 - Projeções da Concentração Atmosférica e Diferença Percentual de Dióxido de Carbono (CO_2) em Santa Catarina para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050.



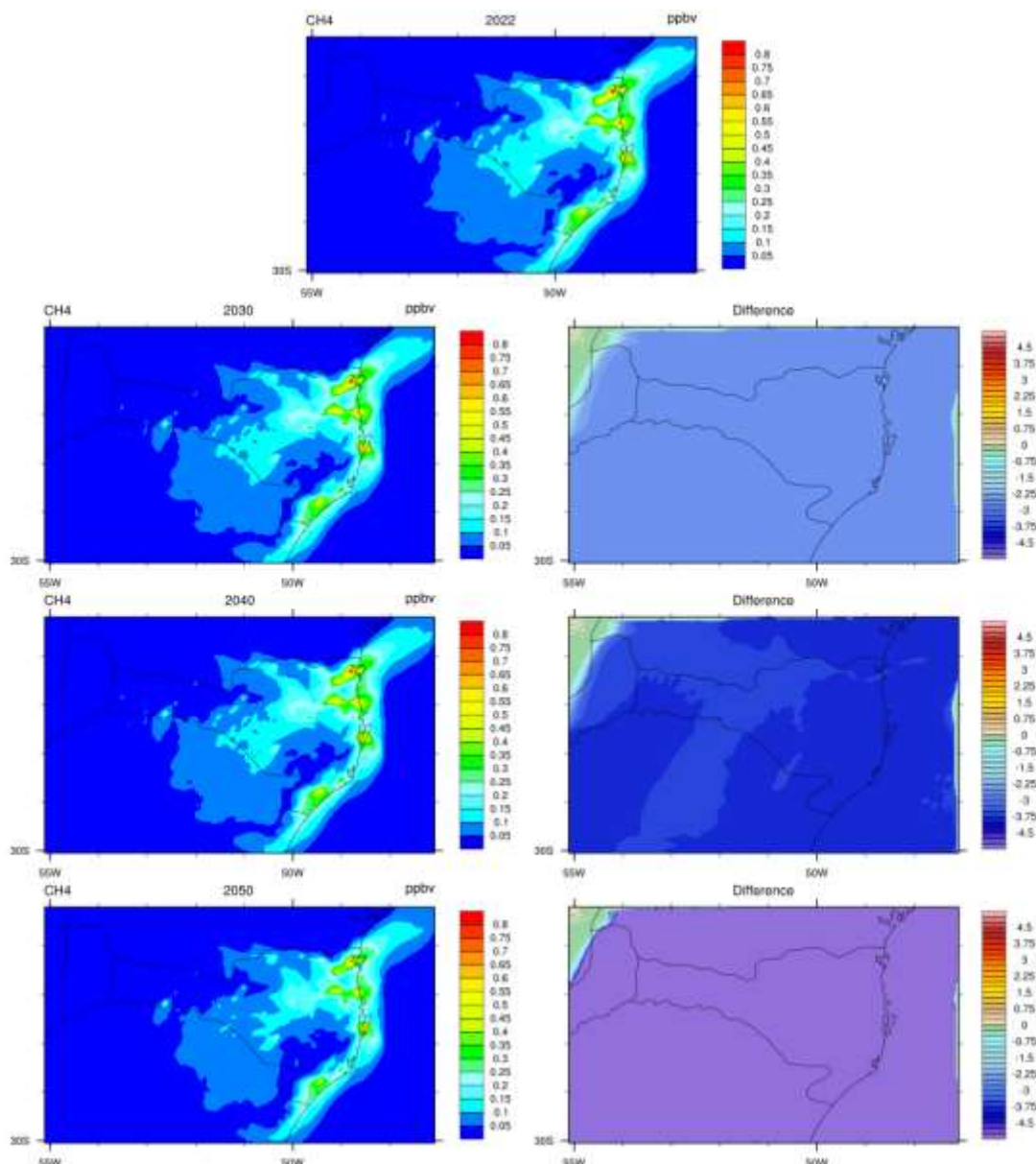
Fonte: Autor, 2025.

A distribuição espacial do metano (CH_4) (Figura 18), expressos em partes por bilhão por volume (ppbv), também indica uma redução gradativa ao longo das

décadas, com as concentrações mais elevadas persistindo nas regiões litorâneas e urbanizadas. As diferenças observadas entre os cenários apontam para variações de decréscimo, particularmente nas porções norte e oeste da área modelada. Na projeção para o ano de 2050 observa-se uma redução de aproximadamente de 17 % na concentração de CH₄ sobre o estado de Santa Catarina. Essas reduções são compatíveis com as alterações propostas nos inventários de emissão das fontes antropogênicas regionais de CH₄, visto que o metano possui uma vida média atmosférica relativamente curta (aproximadamente 12 anos) e sua concentração é significativamente afetada pela substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis na região.

Portanto, os resultados obtidos indicam que a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis promove uma redução significativa na concentração atmosférica regional da concentração do monóxido de carbono (CO) e dos GEE, tais como, dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). Esta constatação, particularmente relevante para a mitigação de emissões provenientes de fontes móveis rodoviárias e estacionárias, está em consonância com estudos prévios realizados por McGraw e Haas (2021), Moore *et al.* (2010) e Litman (2013), os quais também demonstram a compatibilidade e a efetividade dos biocombustíveis na mitigação de poluentes atmosféricos.

Figura 18 - Projeções da Concentração Atmosférica e Diferença Percentual de Metano (CH₄) em Santa Catarina para os anos de 2022, 2030, 2040 e 2050.



Fonte: Autor, 2025.

As simulações revelam consistentemente maior presença de CO, CO₂ e CH₄ nas regiões litorâneas e nas áreas urbanizadas, sobretudo no litoral norte e na região da Grande Florianópolis. Essa distribuição espacial reflete a influência direta das indústrias e do tráfego veicular como principais fontes emissoras desses poluentes. Indicando um aumento generalizado na concentração desses poluentes, possivelmente refletindo mudanças nas fontes de emissão ou condições ambientais que favorecem seu acúmulo (Hanada, 2024).

Adicionalmente, padrões temporais semelhantes de concentração foram observados para os três gases, com maior intensidade nos períodos da manhã e da

tarde, compatíveis com os horários de pico de funcionamento das indústrias e de deslocamento urbano.

Os resultados das simulações, obtidos por meio do modelo WRF-Chem, evidenciaram uma redução gradativa das concentrações dos gases atmosféricos ao longo do tempo. Essa diminuição é uma resposta direta à aplicação dos cenários de mitigação, que preveem a substituição progressiva de combustíveis fósseis por biocombustíveis. Particularmente, as projeções para o cenário de 2050 indicam uma significativa diminuição de 12,18% nas concentrações de GEE. Tais achados demonstram que o modelo empregado foi capaz de simular eficazmente os impactos previstos da transição energética na qualidade do ar local e regional.

A robustez e a versatilidade do modelo WRF-Chem são amplamente reconhecidas na literatura, evidenciadas por sua aplicação bem-sucedida em diversos contextos geográficos. Por exemplo, o modelo tem sido consistentemente empregado em estudos de pesquisa na Península Arábica (Parajuli *et al.*, 2023), uma região que apresenta condições meteorológicas e ambientais complexas. Nesses trabalhos, o componente meteorológico do WRF-Chem tem sido exaustivamente otimizado e validado para simulações regionais, demonstrando sua capacidade de representação acurada dos processos atmosféricos. Essa otimização é um passo crucial para a confiabilidade dos resultados, conforme atestado por diversas publicações que focam nessa área específica (Chaouch *et al.*, 2017; Nelli *et al.*, 2020; Abida *et al.*, 2022; Fonseca *et al.* 2023). Tal histórico de aplicação em regiões com dinâmicas atmosféricas desafiadoras reforça a adequação do WRF-Chem para análises detalhadas de qualidade do ar e emissões.

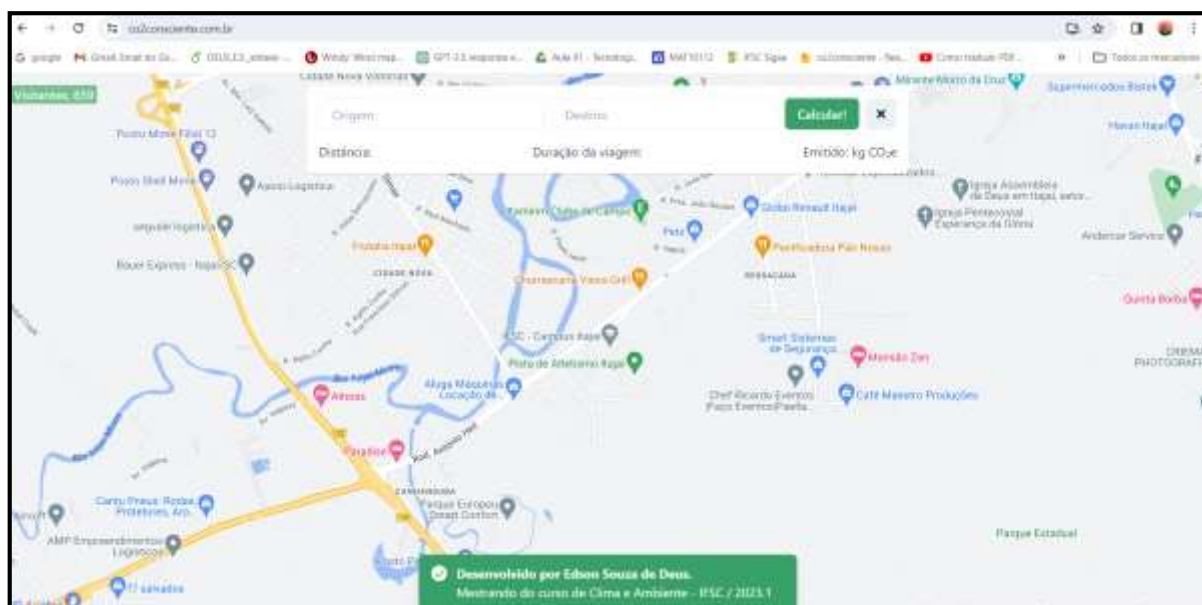
5 PRODUTOS DESENVOLVIDOS

Foram desenvolvidos os seguintes produtos técnico-tecnológicos: Aplicativo CO₂ Consciente, mapas de concentrações de GEE, mapas de emissão de GEE, participação em eventos e submissão de artigo.

5.1 APLICATIVO CO₂ CONSCIENTE

O aplicativo "CO₂ Consciente" (Figura 19) foi desenvolvido como um produto técnico e tecnológico (PTT) e está disponível publicamente por meio do link www.co2consciente.com.br. Esta ferramenta digital fundamenta-se nos parâmetros metodológicos do Programa Brasileiro GHG Protocol, adaptados para uma utilização simplificada por usuários não especializados.

Figura 19: Aplicativo "CO₂ Consciente", disponível publicamente



Fonte: Autor, 2023.

A proposta do aplicativo reside em fornecer uma interface acessível e de fácil manuseio, possibilitando que qualquer indivíduo calcule suas emissões individuais de GEE, considerando o tipo de veículo utilizado, o combustível consumido e a rota planejada. Essa funcionalidade o estabelece como uma valiosa ferramenta de conscientização ambiental e planejamento de mobilidade sustentável. Entre as opções de análise disponíveis, o usuário pode selecionar categorias de veículos como

automóvel, motocicleta, caminhonete, caminhão ou ônibus. Com base nesses dados, o sistema estima as emissões de CO₂ equivalente (tCO₂e) associadas ao trajeto informado.

A criação do aplicativo visa primordialmente contribuir para a formação de uma sociedade mais consciente sobre os impactos das atividades humanas nas mudanças climáticas, oferecendo informações claras e personalizadas acerca da pegada de carbono individual. Ao demonstrar, de maneira interativa, a importância da redução das emissões, o aplicativo reforça a compreensão pública sobre sustentabilidade e responsabilidade ambiental.

Complementarmente, o produto foi desenvolvido com integração a plataformas de visualização e simulação de dados de tráfego no modal rodoviário, permitindo a avaliação de distintos cenários e a seleção de trajetos mais eficientes. Desse modo, o “CO₂ Consciente” configura-se como uma solução tecnológica que conjuga educação ambiental, planejamento urbano e mobilidade sustentável, contribuindo diretamente para estratégias de mitigação das emissões de GEE em escala local. Essa iniciativa busca edificar uma geração mais consciente acerca das questões relativas às mudanças climáticas e à sustentabilidade, disponibilizando à população informações detalhadas sobre suas pegadas de carbono e enfatizando a relevância de sua redução.

5.2 MAPAS DE CONCENTRAÇÕES DE GEE

No presente estudo, realizou-se a modelagem numérica e as simulações geoespaciais das concentrações de GEE oriundas de fontes estacionárias e móveis rodoviárias no estado de Santa Catarina, com recorte temporal na semana de 08 a 14 de julho do ano de 2022. Para tal, empregou-se o modelo WRF-Chem (Weather Research & Forecasting – Chemistry), uma avançada ferramenta de modelagem atmosférica que integra, de forma sinérgica, os processos físicos e químicos da atmosfera. Tal abordagem possibilita simular com alta precisão a concentração, o transporte e a transformação de GEE em escala regional, considerando a influência das condições meteorológicas locais. A aplicação do WRF-Chem viabilizou a confecção de mapas de concentrações e uma análise detalhada das concentrações de GEE ao integrar variáveis atmosféricas essenciais, como velocidade e direção do

vento, temperatura e umidade relativa do ar. Esses fatores são determinantes para a dinâmica de concentração dos GEE.

5.3 MAPAS DE EMISSÕES DE GEE

Adicionalmente o WRF-Chem, no módulo de química atmosférica do modelo permitiu a confecção de mapas de emissões de GEE e reações químicas que ocorrem na troposfera, o que amplifica a compreensão dos impactos das emissões tanto sobre a qualidade do ar quanto sobre o clima regional. Essa modelagem revelou-se fundamental para avaliar os efeitos ambientais das atividades industriais e energéticas no território catarinense, oferecendo subsídios técnicos para o planejamento de ações voltadas à mitigação das emissões e à adaptação às mudanças climáticas. Os resultados obtidos por intermédio do WRF-Chem fornecem bases científicas robustas para a análise das emissões de GEE.

5.4 PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS

A participação na CPAM 2024 (Conferência Panamericana de Meteorologia da América Latina), representou uma etapa significativa no aprofundamento dos conhecimentos técnicos e científicos relacionados à modelagem atmosférica, análise climática e mitigação das emissões de GEE. O evento reuniu pesquisadores, profissionais e instituições de referência no campo das ciências atmosféricas, proporcionando um ambiente propício para a troca de experiências e o acesso às mais recentes inovações na área. Durante a conferência, apresentou-se o trabalho intitulado “Estudo das emissões de GEE diretas de combustões estacionárias e móveis rodoviárias de Santa Catarina”, diretamente relacionado ao escopo da conferência. A interação com especialistas e a exposição às metodologias apresentadas contribuíram diretamente para a consolidação teórica e prática da pesquisa, especialmente no tocante à aplicação do modelo WRF-Chem e à interpretação dos cenários de mitigação de GEE no estado de Santa Catarina.

5.5 SUBMISSÃO DE ARTIGO

O presente estudo possibilitou a elaboração de um artigo intitulado "Analysis of Greenhouse Gases Coming from Road Mobile Sources in the State of Santa Catarina". O artigo foi submetido para publicação nos Anais da Academia Brasileira de Ciências (AABC), um periódico de prestígio e reconhecimento no cenário científico.

Este trabalho, que se insere na discussão vital sobre as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e a busca por alternativas mais sustentáveis, é fruto da colaboração de pesquisadores de diversas instituições renomadas. A autoria do artigo reflete essa interdisciplinaridade e expertise, contando com: Edson Deus, Cassio Suski e Dirceu Herdies do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), destacando o ensino, pesquisa e extensão da instituição; André Reis do National Institute for Space Research (INPE); e Débora Alvim da USP, com atuação na área de Geociências.

Ao abordar a problemática dos combustíveis fósseis e as emissões de GEE, utilizando metodologias reconhecidas como o GHG Protocol, o artigo busca trazer insights valiosos para a compreensão e mitigação dos impactos climáticos em uma região específica do Brasil. As palavras-chave (Road mobile sources, fossil fuel, GHG, GHG Protocol, Santa Catarina) sintetizam o escopo e a importância do trabalho para a comunidade científica e para as políticas públicas de sustentabilidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo principal avaliar o potencial de mitigação das emissões de GEE no estado de Santa Catarina por meio da substituição progressiva de combustíveis fósseis por biocombustíveis e avaliar os impactos na temperatura média global, com foco nas fontes estacionárias (indústrias GPP e termelétrica) e móveis rodoviárias associadas ao transporte. Os resultados demonstraram que a transição energética baseada em biocombustíveis representa uma estratégia viável e promissora, tanto em termos ambientais quanto energéticos, contribuindo significativamente para a descarbonização da matriz energética estadual.

Nos capítulos iniciais, contextualizou-se a análise e a quantificação das principais fontes de emissões estacionárias no estado de Santa Catarina, com destaque para as indústrias de GPP e termelétrica, esta última responsável por aproximadamente 76,5% das emissões diretas de GEE provenientes de fontes estacionárias, no estado, assim como, apresentou-se a estratificação da frota veicular referente ao ano de 2022. A partir da caracterização da matriz energética atual e da identificação das principais fontes emissoras, foi possível desenvolver cenários prospectivos que consideram diferentes níveis de substituição por biocombustíveis até o ano de 2050.

A partir da análise dos cenários projetados para os anos de 2030, 2040 e 2050, observou-se uma redução progressiva nas emissões totais de CO₂e, tendo potencial para chegar a aproximadamente 3 milhões de toneladas de CO₂e a menos em 2050, quando se considera a redução total do uso de combustíveis fósseis nas fontes estacionárias e móveis rodoviárias do estado.

Com base no modelo de cálculo de Ellis (2013), confirmou-se a possibilidade de redução da concentração atmosférica de CO₂e e variações na temperatura média global de 0,000052°C, ainda que sutis, com a utilização de biocombustíveis, indicando os impactos positivos acumulados da transição energética em escala regional. Os resultados confirmam a hipótese inicial de que a adoção progressiva de biocombustíveis, especialmente em setores industriais e de transporte, pode representar uma contribuição significativa para a mitigação climática no contexto catarinense.

A análise também evidenciou que, com base no modelo de cálculo de Ellis (2013), embora os impactos diretos sobre a temperatura média global e temperatura

média de Santa Catarina, sejam limitados devido à escala regional das ações, a contribuição de Santa Catarina para o esforço global de mitigação é relevante, sobretudo se acompanhada de políticas públicas integradas, incentivos econômicos e investimentos em infraestrutura.

Entretanto, é fundamental reconhecer que os resultados aqui apresentados se baseiam em projeções modeladas. A efetividade dessas projeções depende criticamente da implementação de políticas públicas e da adesão do setor produtivo às alternativas energéticas de baixo carbono. Essa dependência constitui uma limitação importante, visto que o ritmo da transição energética pode ser influenciado por diversos fatores externos, como oscilações econômicas, marcos regulatórios, avanços tecnológicos e a disponibilidade de recursos renováveis.

Em síntese, esta pesquisa buscou contribuir para o debate sobre o papel dos biocombustíveis na construção de uma matriz energética mais sustentável para o estado de Santa Catarina. Demonstrou-se que a articulação entre conhecimento técnico, planejamento estratégico e políticas públicas pode efetivamente impulsionar a região rumo a uma economia de baixo carbono, resiliente e ambientalmente responsável. A relevância dessa constatação para os esforços de mitigação do aquecimento global é inegável, dado que as projeções baseadas na metodologia do GHG Protocol indicam significativas reduções nas emissões totais de GEE. Especificamente, prevê-se uma redução de 2,44% até 2030 (com 40% de biocombustível), de 3,66% até 2040 (com 60% de biocombustível) e uma redução mais substancial de 12,18% até 2050 (com 100% de biocombustível). Essa transição energética contempla a substituição de combustíveis fósseis por etanol e biodiesel nas fontes móveis rodoviárias, e por biogás, eletricidade e etanol nas fontes estacionárias.

As simulações conduzidas com o modelo WRF-Chem demonstraram de forma robusta o potencial da substituição progressiva de combustíveis fósseis por biocombustíveis na redução das emissões e concentrações atmosféricas de CO, CO₂ e CH₄ no estado de Santa Catarina. As projeções para 2050 indicam reduções significativas nas concentrações desses gases: aproximadamente 12,18% para os gases de efeito estufa em geral, 15% para o CO₂, 17% para o CH₄ e com redução do CO entre 6 e 8%, cuja diminuição é ainda mais pronunciada em áreas críticas. Os resultados também apontam correlação espacial com áreas urbanas e industriais, além de forte variabilidade diurna, especialmente nos horários de pico. Essa análise

reforça a eficácia dos biocombustíveis como estratégia de mitigação e destaca a importância do uso de modelagem atmosférica para o planejamento urbano e ambiental. Por fim, os dados validam a adequação do WRF-Chem como ferramenta para simulações regionais de qualidade do ar e avaliação de cenários futuros.

Diante dessas perspectivas e das limitações inerentes às projeções modeladas, recomenda-se que estudos futuros aprofundem a análise da viabilidade técnico-econômica da substituição por biocombustíveis por outros modais. É igualmente importante aprimorar a modelagem integrada entre os diversos setores (indústria, transporte e agricultura), com um maior detalhamento territorial. Adicionalmente, sugere-se a incorporação de indicadores sociais e de saúde pública. Tal inclusão permitiria avaliar os co-benefícios da redução das emissões, especialmente nas áreas urbanas mais afetadas pela poluição atmosférica.

7 REFERÊNCIAS

ABUEL GASIM, A.; FARAHAT, A. **Effect of dust loadings, meteorological conditions, and local emissions on aerosol mixing and loading variability over highly urbanized semiarid countries: United Arab Emirates case study.** J.

Atmos. Sol.-Terr. Phys., v. 199, p. 105215, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105215>. Acesso em: 5 jul. 2025.

ABIDA, R. *et al.* **Evaluation of the Performance of the WRF Model in a Hyper-Arid Environment: A Sensitivity Study.** Atmosphere, v. 13, p. 985, 2022.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos13060985>. Acesso em: 5 jul. 2025.

ACS PUBLICATIONS. **Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Biodiesel and Renewable Diesel Production in the United States.** Environmental Science & Technology, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c00289>. Acesso em: 22 jun. 2025.

ALLEN, M. *et al.* **Summary for policymakers. Global Warming of 1.5 °C: an IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emissions Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change.** World Meteorological Organization, p. 1–24, 2018.

ALVES, Pedro Henrique Ferreira. **Avaliação do desempenho do modelo WRF na estimativa de variáveis meteorológicas e da evapotranspiração de referência.** 2016. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/2046>. Acesso em: 8 maio 2025.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Vendas de derivados de petróleo em 2022.** Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>. Acesso em: 13 jun. 2023.

ARELLANO, Jordi V. *et al.* **Atmospheric Boundary Layer: Integrating Air Chemistry and Land Interactions.** Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

BERTOLI, B.; SUSKI, C. A. **Gerenciamento de riscos de desastres naturais em Santa Catarina.** Revista do Departamento de Geografia, v. 44, e227702, 2025. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2024.227702>.

CAVALCANTI, Iracema F. A.; FERREIRA, Nelson J.; SILVA, Maria G. A. J.; DIAS, Maria A. F. S. **Tempo e clima no Brasil.** 2009.

CHAOUCH, N.; TEMIMI, M.; WESTON, M.; GHEDIRA, H. **Sensitivity of the meteorological model WRF-ARW to planetary boundary layer schemes during fog conditions in a coastal arid region.** Atmospheric Research, v. 187, p. 106–127, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.12.009>.

CO2.EARTH. **Daily CO₂.** Disponível em: <https://www.co2.earth/daily-co2>. Acesso em: 12 set. 2024.

CONSEMA - CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONSEMA nº 98, de 05 de maio de 2017.** Disponível em: <https://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/RES%20CONS%20EMA%2098%202017%20compilada%20-%20SDS%2014fev18%20-%20inclui%20consema%20112-2017.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2023.

CRUZ, F. A. da; D'AVILA, S. L. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2013.** 84 f. Trabalho de conclusão de curso (Tecnólogo em Processos Ambientais) – Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: [link não fornecido]. Acesso em: 01 jun. 2024.

CUNHA, Sandra B.; GUERRA, Antônio J. T. (orgs). **A questão ambiental: diferentes abordagens.** 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

DETRAN SC – DEPARTAMENTO ESTADUAL DE TRÂNSITO. **Veículos em circulação em Santa Catarina, por tipo.** Disponível em: <https://www.detran.sc.gov.br/transparencia/estatisticas/veiculos-2/>. Acesso em: 10 set. 2023.

EEA. **Climate change – impacts and vulnerability in Europe 2015: an indicator-based report.** European Environment Agency, 2015. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/soer/2015/global/climate>. Acesso em: 12 set. 2024.

ELLIS, Todd D.; STEPHENS, Graeme L. **Controls of Global-Mean Precipitation Increases in Global Warming GCM Experiments.** Journal of Climate, v.21, n.23, p. 6141- 6155, 2013.

ELLIS, Robert. **Equation for Global Warming: Derivation and Application.** 2013. Disponível em: <https://www.worldstormcentral.co/globalwarmingeqn/globalwarmingeqn.html>. Acessado em: 11 out. 2023.

ELTAHAN, M.; SHOKR, M.; SHERIF, A. O. **Simulation of severe dust events over Egypt using tuned dust schemes in Weather Research Forecast (WRF-Chem).** Atmosphere, v. 9, p. 246, 2018. <https://doi.org/10.3390/atmos9070246>.

ENGIE. **Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – Relatório Anual 2019.** Disponível em: <https://www.engie.com.br/uploads/2018/11/ctjl-ceut-anual-2019.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2025.

EPA - AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS. **Overview of Greenhouse Gases. 2021.** Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>. Acesso em: 29 jun. 2024.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Stationary Sources of Air Pollution.** 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution>. Acesso em: 29 jun. 2024.

ESTÊVEZ, L. F. **Biogeografia, climatologia e hidrogeografia: fundamentos teóricos-conceituais e aplicados**. Curitiba: InterSaberes, 2016.

ECMWF - EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS. **ERA5: fifth generation ECMWF reanalysis of the global climate. Reading: Copernicus Climate Change Service (C3S)**, 2023. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. Acesso em: 22 nov. 2024.

FGV – FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Guia para a elaboração de inventários corporativos de emissões de gases do efeito estufa**. São Paulo: FGV, 2009. 22 p.

FGV – FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Programa Brasileiro GHG Protocol**. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 12 out. 2023.

FONSECA, R.; FRANCIS, D. **Satellite derived trends and variability of CO₂ concentrations in the Middle East during 2014–2023**. *Frontiers in Environmental Science*, v. 11, p. 1289142, 2023. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1289142>.

FRANCISCONI JUNIOR, J. P. *et al.* **Contribuição do Programa de Infraestrutura Logística de Santa Catarina na redução das emissões de gases de efeito estufa**. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 694–710, 2016. Disponível em: <https://revistas.uninter.com/gestaoambiental/article/view/1604>. Acesso em: 8 jun. 2025.

GENG, Y.; WANG, H.; LEISHENG, L. **Carbon emission factors for stationary sources and their application in national inventories**. *Journal of Cleaner Production*, v. 258, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120617>.

GRELL, G. A.; PECKHAM, S. E.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S. A.; FROST, G.; SKAMAROCK, W. C.; EDER, B. **Fully coupled online chemistry within the WRF model**. *Atmospheric Environment*, v. 39, p. 6957-6975, 2005.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL. **About us - GHG Protocol**. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/about-us>. Acesso em: 08 jul. 2024.

FRIEDLINGSTEIN, P.; JONES, M. W.; O'SULLIVAN, M.; ANDREW, R. M.; HAUCK, J.; PETERS, G. P.; PETERS, W.; PONGRATZ, J.; SITCH, S.; QUÉRÉ, C. L.; *et al.* **Global Carbon Budget**. *Earth System Science Data*, 2019, v. 11, p. 1783–1838.

HANADA, Ana Paula Marcon. **A poluição atmosférica em Santa Catarina: estudo de 2008 a 2022**. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024. Orientador: Dirceu Luis Herdies; Coorientador: Mário Francisco Leal de Quadro.

HEATHFIELD, T.; KEEBLE, C.; BISHOP, G.; CLARK, N. **Exhaust emission factors of greenhouse gases from European road vehicles**. Atmospheric Environment, v. 222, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117147>..

HORVATH, K.; KORACIN, D. R.; VELLORE, R. **Sub-kilometer dynamical downscaling of near-surface winds in complex terrain using WRF and MM5 mesoscale models**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 117, D11111, 2022. DOI: 10.1029/2012JD017432. Disponível em: <https://www.dri.edu/publication/4059/>. Acesso em: 04 maio 2025.

HU, Y.; SHI, Y. **Estimating CO₂ emissions from large scale coal-fired power plants using OCO-2 observations and emission inventories**. Atmosphere 2021, 12, 811.

HUANG, M. *et al.* **WRF-GHG: a coupled greenhouse-gas modeling system based on WRF and CMAQ**. Geoscientific Model Development, v. 13, p. 859–878, 2020. DOI: 10.5194/gmd-13-859-2020

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 13 jun. 2023.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Analysis and forecast to 2028**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Acesso em: 22 jun. 2025.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2014. Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2022. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf. Acesso em: 13 out. 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Aquecimento Global de 1,5°C**. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html. Acesso em: 12 jun. 2023.

IMA - INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA. **Empreendedores, 2022**. Disponível em: <https://ima.sc.gov.br/index.php/o-instituto/empreendedores>. Acesso em: 13 jun. 2023.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (Brasil). **Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular: tabelas de consumo e eficiência energética de veículos leves – ano 2022**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/programas-de-avaliacao-da-conformidade/etiquetagem/veicular>. Acesso em: 01 dez. 2024.

IRIART, P.; SILVA, A.; FISCH, G. **Uso de modelos atmosféricos de alta resolução para a determinação dos ventos no Centro de Lançamento de Alcântara**. *Ciência e Natura*, v. especial/Novembro - VIII Brazilian Micrometeorology Workshop, p. 402-404, 2016.

JANKOV, I.; GRASSO, L.; SENGUPTA, M.; NEIMAN, P. J.; ZUPANSKI, D.; ZUPANSKI, M.; LINDSEY, D.; BRUMMER, R. **An evaluation of five ARW-WRF microphysics schemes using synthetic GOES imagery for an atmospheric river event affecting the California coast**. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, v. 12, p. 618–633.

JACOB, Daniel J. **Introduction to Atmospheric Chemistry**. 2. ed. Cambridge: Harvard University, 2024. Disponível em: <https://acmg.seas.harvard.edu/education-2nd-edition/>. Acesso em: 04 maio 2025.

KOMAROMI, W. A.; REINECKE, P. A.; DOYLE, J. D.; MOSKAITIS, J. R. **The Naval Research Laboratory's Coupled Ocean–Atmosphere Mesoscale Prediction System-Tropical Cyclone Ensemble (COAMPS-TC Ensemble)**. *Weather and Forecasting*, v. 36, n. 2, p. 499–517, 2021. DOI: 10.1175/WAF-D-20-0038.1. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/abstract/journals/wefo/36/2/WAF-D-20-0038.1.xml>. Acesso em: 04 maio 2025.

KREY, V. *et al.* **Looking under the hood: A comparison of techno-economic assumptions across national and global integrated assessment models**. *Energy*, v. 172, p. 1254–1267, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.075.

LAMIM, G. *et al.* **Inventory of greenhouse gas (GHG) emissions from the modal system on the port cargo route of Santa Catarina**. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 13, n. 2, e4221325490, 2024. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i2.25490>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/25490>. Acesso em: 8 jun. 2025.

LI, T. Y.; DENG, X. J.; LI, Y.; SONG, Y. S.; LI, L. Y.; TAN, H. B.; WANG, C. L. **Transport paths and vertical exchange characteristics of haze pollution in Southern China**. *Science of the Total Environment*, v. 625, p. 1074–1087, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.235>.

LI, Y.; GIBSON, J. M. D.; JAT, P.; PUGGIONI, G.; HASAN, M.; WEST, J. J.; VIZUETE, W.; SEXTON, K.; SERRE, M. **Burden of disease attributed to anthropogenic air pollution in the United Arab Emirates: Estimates based on observed air quality data**. *Science of the Total Environment*, v. 408, p. 5784–5793, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.017>.

LITMAN, T. **Comprehensive evaluation of energy conservation and emission reduction policies**. *Transportation Research A*, v. 47, p. 153-166, 2013.

LIU, B.; MA, X.; MA, Y.; LI, H.; JIN, S.; FAN, R.; GONG, W. **The relationship between atmospheric boundary layer and temperature inversion layer and their aerosol capture capabilities.** Atmos. Res. 2022,

MADER, M. M. **Análise da influência do dióxido de nitrogênio nas emissões de gases e consumo de combustível em ônibus de transporte coletivo da grande Florianópolis.** 2019. 164 f. Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina., Florianópolis, 2019. Disponível em: Acesso em: 01 jun. 2024

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* IPCC, 2018: **Summary for policymakers. In: Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.** World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, p. 10, 2018.

MCGRAW, J. E.; HAAS, P. **An update on public transportation's impacts on greenhouse gas emissions.** Washington, DC: The National Academies Press, 2021. <https://doi.org/10.17226/26103>.

MELO, Vanessa S.; SINFRÔNIO, Francisco S. M. **A importância dos inventários do Programa Brasileiro GHG Protocol para a gestão das emissões ambientais: estudo de caso do Maranhão.** Natural Resources, v. 8, n. 2, p. 38-51, 2018.

MCTI – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INFORMAÇÃO. **Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (2020).** Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2020/10/inventario-nacional-de-gee-subsidia-planos-do-governo-na-area-ambiental>. Acesso em: 10 dez. 2023.

MCTI – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INFORMAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil.** Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene>. Acesso em: 10 mar. 2024.

MIKHAYLOV, A.; MOISEEV, N.; ALESHIN, K.; BURKHARDT, T. **Global climate change and greenhouse effect.** Entrepreneurship and Sustainability Issues, v. 7, p. 2897, 2020.

MOORE, A. T.; SAMUEL, R. S.; ROBERT, W. P. **The role of VMT reduction in meeting climate change policy goals.** Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 44, n. 8, p. 565-574, 2010.

NASA - GLOBAL MODELING AND ASSIMILATION OFFICE (GMAO). **GEOS-5 Atmospheric Data Assimilation System. Greenbelt: NASA Global Modeling and Assimilation Office (GMAO),** 2023. Disponível em: <https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/gmao/geos-fp/das/Y2022/M07>. Acesso em: 22 nov. 2024.

NCAR - NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. **Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM). Boulder: University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)**, 2023. Disponível em: <https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/gmao/geos-fp/das/Y2022/M07>. Acesso em: 22 nov. 2024.

NCDC - NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER. **Layers of the atmosphere. 2024.** Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/news/layers-atmosphere>. Acesso em: 27 abr. 2025.

NELLI, N. R.; TEMIMI, M.; FONSECA, R. M.; WESTON, M. J.; THOTA, M. S.; VALAPPIL, V. K.; BRANCH, O.; WULFMEYER, V.; WEHBE, Y.; AL HOSARY, T.; SHALABY, A.; AL SHAMSI, N.; AL NAQBI, H. **Impact of roughness length on WRF simulated land-atmosphere interactions over a hyper-arid region.** Earth and Space Science, v. 7, e2020EA001165, 2020. <https://doi.org/10.1029/2020EA001165>.

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Stratospheric ozone: The science and impacts of ozone depletion.** Washington, D.C., 2023. Disponível em: <https://www.noaa.gov>. Acesso em: 4 maio 2025.

ODA, T.; MAKSYUTOV, S. **A very high-resolution (1 km × 1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights.** Atmospheric Chemistry and Physics, 2011.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Aquecimento global atinge níveis sem precedentes e dispara "alerta vermelho" para a humanidade.** Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/139401-aquecimento-global-atinge-n%C3%ADveis-sem-precedentes-e-dispara-alerta-vermelho-para-humanidade>. Acesso em: 12 out. 2023.

PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; PANDEY, J. S. **Carbon footprint: Current methods of estimation.** Environmental Monitoring and Assessment, v. 178, p. 135–160, 2011..

PARAJULI, S. P.; STENCHIKOV, G. L.; UKHOV, L.; MORRISON, H.; SHEVCHENKO, I.; MOSTAMANDI, S. **Simulation of a dust-and-rain event across the Red Sea using WRF-Chem.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 128, e2022JD038384, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022JD038384>.

PÉREZ, Isidro A. *et al.* **Key points in air pollution meteorology.** International Journal of Environmental Research and Public Health, [s. l.], v. 17, n. 22, p. 1–14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17228349>. Acesso em: 20 mai. 2024.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2023.** Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 7 maio 2024.

RIVERA, J. E.; CHARÁ, J. **CH₄ and N₂O emissions from cattle excreta: A review of main drivers and mitigation strategies in grazing systems.** Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 5, 657936, 2021.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Conheça as emissões de gases de efeito estufa no Brasil (2023)**. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 03 fev. 2024.

SEINFELS, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change**. Wiley, 2016. 1152 p.

SENATRAN – SECRETARIA NACIONAL DE TRÂNSITO. **Composição da frota veicular de Santa Catarina (2022)**. Disponível em: <https://portalservicos.senatran.serpro.gov.br/#/home>. Acesso em: 10 ago. 2023.

SENTEK, K.; WIECZOREK, A.; ZAKRZEWSKA, M.; STROINSKI, J. **High-resolution spatial GHG emissions inventory for Poland: methodology and policy applications**. *Environmental Modelling & Software*, v. 165, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105820>.

SHAHBAZ, M.; SBIA, R.; HAMD, H.; OZTURK, I. **Economic growth, electricity consumption, urbanization and environmental degradation relationship in United Arab Emirates**. *Ecological Indicators*, v. 45, p. 622–631, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.022>.

SHINDELL, D.; FALUVEGI, G. **The net climate impact of coal-fired power plant emissions**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, p. 3247–3260, 2010.

SINFAT – SISTEMA DE INFORMAÇÕES AMBIENTAIS. **Base de informações de empreendedores de Santa Catarina**. Disponível em: <https://sinfat.ciga.sc.gov.br/empreendedores/2022>. Acesso em: 13 jun. 2023.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J. **A description of the Advanced Research WRF version 3**. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research Technical Note: NCAR/TN-475+STR, 2008. 113 p.

SKAMAROCK, W.C.; KLEMP, J.B. **A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications**. *J. Comput. Phys.* 2008, 227p., 3465–3485.

SOUZA, Maria C. O.; CORAZZA, Rosana I. **Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa**. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 42, p. 52-80, dez. 2017.

STREETS, D. G. *et al.* **An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000**. *Journal of Geophysical Research*, 2003.

TEIXIDO, O.; TOBIAS, A.; MASSAGUE, J.; MOHAMED, R.; EKAABI, R.; HAMED, H. I.; PERRY, R.; QUEROL, X.; AL HOSANI, S. **The influence of COVID-19 preventive measures on the air quality in Abu Dhabi (United Arab Emirates)**. *Air Quality, Atmosphere & Health*, v. 14, p. 1071–1079, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01000-2>.

TOLEDO, André Luiz Lopes. **Emissões de gases de efeito estufa da mobilidade urbana: o caso de Natal. 2019.** 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

UNITED STATES. GLOBAL CHANGE RESEARCH PROGRAM. **Atmospheric carbon dioxide. 2024.** Disponível em: <https://www.globalchange.gov/indicators/atmospheric-carbon-dioxide>. Acesso em: 12 set. 2024.

VAGDATLI, E.; PETROUTSATOU, K. **Environmental assessment of transport projects: distinction between direct and indirect GHG emissions.** Transportation Research Procedia, v. 60, p. 1–8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.12.001>.

VALLERO, Daniel. **Fundamentals of air pollution.** [S. l.: s. n.], 2014. ISSN 1098-6596. v. 53. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>. Acesso em: 10 mai. 2023.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: An introductory survey.** 2. ed. Amsterdã: Academic Press, 2006.

WANG, Jian *et al.* **Lidar remote sensing.** Encyclopedia of Remote Sensing. Springer, New York, NY, 2014.

WOLFF, S.; EHRET, G.; KIEMLE, C.; AMEDIEK, A.; QUATREVALET, M.; WIRTH, M.; FIX, A. **Determination of the emission rates of CO₂ point sources with airborne lidar.** Atmospheric Measurement Techniques, v. 14, p. 2717–2736, 2021.

WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL. **O saldo da COP26: o que a Conferência do Clima significou para o Brasil e o mundo.** Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/blog/clima/o-saldo-da-cop26-o-que-conferencia-do-clima-significou-para-o-brasil-e-o-mundo>. Publicado em: novembro de 2021. Acesso em: 12 set. 2023.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Mobile sources, such as cars and trucks, are significant contributors to air pollution, particularly in urban areas.** 2018. Disponível em: <https://www.who.int/airpollution/ambient/en/>. Acesso em: 29 jun. 2024.

YARRAGUNTA, Y.; SRIVASTAVA, S.; MITRA, D.; CHANDOLA, H. C. **Influence of forest fire episodes on the distribution of gaseous air pollutants over Uttarakhand, India.** GIScience Remote Sensing, v. 57, p. 190–206, 2020. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1712100>.

YIN, H.; LU, X.; SUN, Y.; LI, K.; GAO, M.; ZHENG, B.; LIU, C. **Unprecedented decline in summertime surface ozone over eastern China in 2020 comparably attributable to anthropogenic emission reductions and meteorology.** Environmental Research Letters, v. 16, p. 124069, 2021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3e22>.

YU, Entao; MA, Jiehua; SUN, Jianqi. **Developing a climate prediction system over Southwest China using the 8-km Weather Research and Forecasting (WRF) model: system design, model calibration, and performance evaluation.** *Weather and Forecasting*, v. 37, n. 9, p. 1703–1719, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0188.1>. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/37/9/WAF-D-21-0188.1.xml>. Acesso em: 04 maio 2025.

ZHANG, W.; FAROOQ, B. **A segment-level model for vehicular GHG emissions: integrating econometrics with road network characteristics.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 105, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103248>.

ZHAO, X.; MARSHALL, J.; HACHINGER, S.; GERBIG, C.; FREY, M.; HASE, F.; CHEN, J. **Analysis of total column CO₂ and CH₄ measurements in Berlin with WRF-GHG.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-19-11279-2019>. Acesso em: 29 jun. 2024.

APÊNDICE A – Desempenho Energético de Veículos (2022)

Projeções das emissões estacionárias por indústrias de GPP em Santa Catarina, em tCO₂e, para os anos de 2030, 2040 e 2050 conforme cenários, considerando a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis.

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
1	AGRÔNÔMICA	Óleo Diesel	40	Eletricidade	24	16	0
2	ÁGUA DOCE	Óleo Diesel	3952	Etanol	3810	3739	3596
3	ÁGUA DOCE	Óleo Diesel	3906	Etanol	3765	3695	3554
4	ÁGUAS FRIAS	Óleo Diesel	68	Eletricidade	41	27	0
5	ANCHIETA	Óleo Diesel	21	Etanol	20	20	19
6	ARAQUARI	Óleo Diesel	241	Etanol	233	228	219
7	ARAQUARI	Óleo Diesel	229	Etanol	221	217	208
8	ARAQUARI	Óleo Diesel	260	Etanol	250	246	236
9	ARAQUARI	Óleo Diesel	260	Etanol	251	246	237
10	ARAQUARI	Óleo Diesel	246	Etanol	237	232	223
11	ARARANGUÁ	Óleo Diesel	105	Etanol	101	99	96
12	ARARANGUÁ	Óleo Diesel	100	Etanol	96	95	91
13	ARMAZÉM	Óleo Diesel	40	Eletricidade	24	16	0
14	ARROIO TRINTA	Óleo Diesel	16	Eletricidade	10	6	0
15	BALNEÁRIO DE PIÇARRAS	Óleo Diesel	339	Eletricidade	203	136	0
16	BENEDITO NOVO	Óleo Diesel	545	Etanol	525	516	496
17	BIGUAÇU	Óleo Diesel	36	Eletricidade	22	14	0
18	BIGUAÇU	Óleo Diesel	38	Etanol	37	36	35
19	BIGUAÇU	Óleo Diesel	69	Etanol	67	66	63
20	BIGUAÇU	Óleo Diesel	33	Etanol	32	31	30
21	BIGUAÇU	Biogás	37	Biogás	37	37	37
22	BLUMENAU	Biogás	166	Biogás	166	166	166
23	BLUMENAU	Biogás	266	Biogás	266	266	266
24	BLUMENAU	Óleo Diesel	2696	Etanol	2599	2551	2454
25	BLUMENAU	Óleo Diesel	3005	Etanol	2896	2842	2734
26	BOM RETIRO	Óleo Diesel	1	Etanol	1	1	1
27	BOM RETIRO	Óleo Diesel	1	Etanol	1	1	1
28	BOM RETIRO	Óleo Diesel	3	Etanol	2	2	2
29	BOTUVERÁ	Óleo Diesel	1044	Etanol	1006	988	950
30	BOTUVERÁ	Óleo Diesel	610	Etanol	588	577	555
31	BOTUVERÁ	Óleo Diesel	358	Etanol	345	339	326
32	BOTUVERÁ	Óleo Diesel	459	Etanol	442	434	418
33	BOTUVERÁ	Óleo Diesel	425	Etanol	410	402	387
34	BOTUVERÁ	Óleo Diesel	403	Etanol	388	381	367
35	BRAÇO DO NORTE	Óleo Diesel	65	Eletricidade	39	26	0
36	BRAÇO DO NORTE	Óleo Diesel	53	Eletricidade	32	21	0
37	BRAÇO DO NORTE	Óleo Diesel	68	Eletricidade	41	27	0
38	BRAÇO DO NORTE	Óleo Diesel	50	Eletricidade	30	20	0

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
39	BRAÇO DO NORTE	Óleo Diesel	70	Eleticidade	42	28	0
40	BRAÇO DO TROMBUDO	Óleo Diesel	175	Eleticidade	105	70	0
41	BRUSQUE	Óleo Diesel	135	Etanol	130	128	123
42	BRUSQUE	Óleo Diesel	407	Eleticidade	244	163	0
43	BRUSQUE	Óleo Diesel	128	Etanol	123	121	116
44	BRUSQUE	Óleo Diesel	141	Etanol	136	133	128
45	BRUSQUE	Óleo Diesel	835	Eleticidade	501	334	0
46	CAÇADOR	Óleo Diesel	957	Etanol	923	906	871
47	CAÇADOR	Óleo Diesel	473	Etanol	456	447	430
48	CAÇADOR	Óleo Diesel	915	Etanol	882	865	832
49	CAÇADOR	Biogás	459	Biogás	459	459	459
50	CAÇADOR	Óleo Diesel	904	Etanol	871	855	822
51	CAMBORIÚ	Óleo Diesel	132	Etanol	127	125	120
52	CAMBORIÚ	Óleo Diesel	107	Etanol	103	101	97
53	CAMBORIÚ	Óleo Diesel	65	Etanol	63	61	59
54	CAMBORIÚ	Óleo Diesel	115	Etanol	111	109	104
55	CAMPO ALEGRE	Óleo Diesel	6	Etanol	6	6	5
56	CAMPO ALEGRE	Óleo Diesel	10	Etanol	10	9	9
57	CAMPO ALEGRE	Óleo Diesel	7	Etanol	7	7	6
58	CAMPO ALEGRE	Óleo Diesel	8	Etanol	8	8	7
59	CAMPOS NOVOS	Óleo Diesel	541	Etanol	522	512	492
60	CAMPOS NOVOS	Óleo Diesel	528	Etanol	509	499	480
61	CAMPOS NOVOS	Óleo Diesel	518	Etanol	500	490	472
62	CAMPOS NOVOS	Óleo Diesel	12	Etanol	12	11	11
63	CAMPOS NOVOS	Óleo Diesel	744	Eleticidade	446	298	0
64	CANOINHAS	Óleo Diesel	667	Etanol	643	631	607
65	CANOINHAS	Óleo Diesel	2661	Etanol	2565	2517	2422
66	CANOINHAS	Óleo Diesel	263	Etanol	254	249	239
67	CANOINHAS	Óleo Diesel	2585	Etanol	2492	2445	2352
68	CANOINHAS	Óleo Diesel	1266	Etanol	1220	1198	1152
69	CAPINZAL	Óleo Diesel	5676	Etanol	5471	5369	5165
70	CAPINZAL	Óleo Diesel	5285	Etanol	5095	5000	4809
71	CAPIVARI DE BAIXO	Biogás	245	Biogás	245	245	245
72	CAPIVARI DE BAIXO	Óleo Diesel	220	Etanol	212	208	200
73	CHAPECÓ	Óleo Diesel	742	Etanol	715	702	675
74	CHAPECÓ	Óleo Diesel	951	Etanol	917	900	865
75	CHAPECÓ	Óleo Diesel	1908	Etanol	1839	1805	1736
76	CHAPECÓ	Óleo Diesel	863	Etanol	832	816	785
77	CHAPECÓ	Óleo Diesel	2297	Etanol	2214	2173	2090
78	CHAPECÓ	Óleo Diesel	1192	Etanol	1149	1128	1085
79	CHAPECÓ	Óleo Diesel	578	Etanol	557	547	526
80	CHAPECÓ	Óleo Diesel	3012	Etanol	2903	2849	2741

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
81	CHAPECÓ	Óleo Diesel	1804	Etanol	1739	1707	1642
82	COCAL DO SUL	Óleo Diesel	4856	Etanol	4681	4594	4419
83	CONCÓRDIA	Óleo Diesel	317	Etanol	306	300	289
84	CONCÓRDIA	Óleo Diesel	472	Etanol	455	446	429
85	CONCÓRDIA	Óleo Diesel	517	Etanol	499	489	471
86	CONCÓRDIA	Óleo Diesel	158	Etanol	152	149	144
87	CONCÓRDIA	Óleo Diesel	676	Etanol	652	640	615
88	CONCÓRDIA	Óleo Diesel	483	Etanol	465	457	439
89	CONCÓRDIA	Óleo Diesel	499	Etanol	481	472	454
90	CORDILHEIRA ALTA	Óleo Diesel	10	Etanol	10	9	9
91	CORDILHEIRA ALTA	Óleo Diesel	13	Etanol	13	12	12
92	CORDILHEIRA ALTA	Óleo Diesel	16	Etanol	15	15	15
93	CORDILHEIRA ALTA	Óleo Diesel	15	Etanol	14	14	14
94	CORDILHEIRA ALTA	Óleo Diesel	12	Etanol	12	11	11
95	CORDILHEIRA ALTA	Óleo Diesel	12	Etanol	12	11	11
96	CORDILHEIRA ALTA	Óleo Diesel	20	Etanol	19	19	18
97	CORDILHEIRA ALTA	Óleo Diesel	10	Etanol	10	9	9
98	CORONEL FREITAS	Óleo Diesel	15	Etanol	14	14	14
99	CORONEL FREITAS	Óleo Diesel	16	Etanol	15	15	15
100	CORONEL FREITAS	Óleo Diesel	17	Etanol	16	16	15
101	CORREIA PINTO	Biomassa	1600	Biomassa	1600	1600	1600
102	CORREIA PINTO	Óleo Diesel	1490	Etanol	1436	1409	1356
103	CORREIA PINTO	Óleo Diesel	1530	Etanol	1475	1447	1392
104	CORREIA PINTO	Óleo Diesel	1612	Etanol	1554	1525	1467
105	CORREIA PINTO	Óleo Diesel	1640	Etanol	1581	1551	1492
106	CORREIA PINTO	Óleo Diesel	1420	Etanol	1369	1343	1292
107	CORREIA PINTO	Óleo Diesel	1550	Etanol	1494	1466	1410
108	CORREIA PINTO	Óleo Diesel	1401	Etanol	1351	1325	1275
109	CORREIA PINTO	Biomassa	1534	Biomassa	1534	1534	1534
110	CORUPÁ	Biogás	424	Biogás	424	424	424
111	CRICIÚMA	Biomassa	32125	Biomassa	32125	32125	32125
112	CRICIÚMA	Coque de Carvão Mineral	49548	Coque de Carvão Mineral	49548	49548	49548
113	CRICIÚMA	Biogás	465	Biogás	465	465	465

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
114	CRICIÚMA	Coque de Carvão Mineral	87422	Coque de Carvão Mineral	87422	87422	87422
115	CRICIÚMA	Coque de Carvão Mineral	66763	Coque de Carvão Mineral	66763	66763	66763
116	CRICIÚMA	Óleo Diesel	4569	Etanol	4404	4322	4157
117	CRICIÚMA	Óleo Diesel	12056	Etanol	11622	11404	10970
118	CURITIBANOS	Óleo Diesel	489	Etanol	471	463	445
119	CURITIBANOS	Óleo Diesel	581	Etanol	560	550	529
120	CURITIBANOS	Biogás	647	Biogás	647	647	647
121	ERVAL VELHO	Óleo Diesel	23	Eletricidade	14	9	0
122	FAXINAL DOS GUEDES	Óleo Diesel	977	Eletricidade	586	391	0
123	FLORIANÓPOLIS	Biogás	208	Biogás	208	208	208
124	FLORIANÓPOLIS	Óleo Diesel	150	Etanol	145	142	136
125	FLORIANÓPOLIS	Óleo Diesel	153	Etanol	147	145	139
126	FLORIANÓPOLIS	Óleo Diesel	98	Etanol	94	93	89
127	FORQUILHINHA	Óleo Diesel	283	Eletricidade	170	113	0
128	FRAIBURGO	Óleo Diesel	273	Etanol	263	258	248
129	FRAIBURGO	Óleo Diesel	150	Etanol	145	142	136
130	FRAIBURGO	Óleo Diesel	160	Etanol	154	151	146
131	FRAIBURGO	Óleo Diesel	179	Etanol	173	169	163
132	GARUVA	Óleo Diesel	451	Etanol	435	427	410
133	GARUVA	Óleo Diesel	594	Etanol	573	562	541
134	GARUVA	Óleo Diesel	708	Etanol	683	670	644
135	GARUVA	Óleo Diesel	811	Etanol	782	767	738
136	GARUVA	Óleo Diesel	456	Etanol	440	431	415
137	GASPAR	Óleo Diesel	160	Etanol	154	151	146
138	GASPAR	Óleo Diesel	193	Etanol	186	183	176
139	GASPAR	Óleo Diesel	173	Etanol	167	164	157
140	GASPAR	Óleo Diesel	154	Etanol	148	146	140
141	GASPAR	Óleo Diesel	366	Etanol	353	346	333
142	GASPAR	Óleo Diesel	168	Etanol	162	159	153
143	GASPAR	Óleo Diesel	346	Etanol	333	327	314
144	GOVERNADOR CELSO RAMOS	Óleo Diesel	89	Etanol	86	84	81
145	GRAVATAL	Óleo Diesel	237	Etanol	228	224	216
146	GRAVATAL	Óleo Diesel	150	Etanol	145	142	136
147	GRAVATAL	Óleo Diesel	440	Etanol	424	416	400
148	GUARACIABA	Óleo Diesel	12	Etanol	12	11	11
149	GUARACIABA	Óleo Diesel	5	Etanol	5	5	5
150	GUARAMIRIM	Óleo Diesel	107	Etanol	103	101	97
151	GUARAMIRIM	Óleo Diesel	228	Etanol	220	216	208
152	GUARAMIRIM	Óleo Diesel	108	Etanol	104	102	98
153	GUARAMIRIM	Óleo Diesel	296	Etanol	285	280	269
154	GUATAMBÚ	Óleo Diesel	239	Etanol	230	226	217
155	GUATAMBÚ	Óleo Diesel	125	Etanol	120	118	114
156	GUATAMBÚ	Óleo Diesel	105	Etanol	101	99	96

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
157	HERVAL OESTE D	Óleo Diesel	452	Etanol	436	428	411
158	HERVAL OESTE D	Óleo Diesel	1731	Etanol	1668	1637	1575
159	HERVAL OESTE D	Óleo Diesel	1500	Etanol	1446	1419	1365
160	IBICARÉ	Óleo Diesel	859	Etanol	828	813	782
161	IBIRAMA	Óleo Diesel	128	Etanol	123	121	116
162	IBIRAMA	Óleo Diesel	89	Etanol	86	84	81
163	IBIRAMA	Óleo Diesel	242	Etanol	234	229	221
164	IÇARA	Óleo Diesel	169	Etanol	163	160	154
165	IÇARA	Biogás	178	Biogás	178	178	178
166	IÇARA	Óleo Diesel	292	Etanol	282	276	266
167	IÇARA	Óleo Diesel	489	Etanol	472	463	445
168	IÇARA	Óleo Diesel	864	Etanol	833	817	786
169	INDAIAL	Biogás	42	Biogás	42	42	42
170	INDAIAL	Óleo Diesel	35	Elettricidade	21	14	0
171	INDAIAL	Óleo Diesel	176	Etanol	170	166	160
172	INDAIAL	Óleo Diesel	102	Etanol	99	97	93
173	INDAIAL	Óleo Diesel	41	Etanol	40	39	37
174	IOMERÊ	Óleo Diesel	61	Etanol	59	58	56
175	IOMERÊ	Óleo Diesel	30	Etanol	29	28	27
176	IPUAÇU	Óleo Diesel	43	Etanol	41	41	39
177	ITAIÓPOLIS	Óleo Diesel	298	Etanol	288	282	272
178	ITAJAÍ	Óleo Diesel	2515	Etanol	2424	2379	2288
179	ITAJAÍ	Óleo Diesel	1088	Etanol	1049	1029	990
180	ITAJAÍ	Óleo Diesel	299	Etanol	288	283	272
181	ITAJAÍ	Óleo Diesel	257	Etanol	248	243	234
182	ITAJAÍ	Óleo Diesel	413	Etanol	398	391	376
183	ITAJAÍ	Óleo Diesel	1428	Etanol	1377	1351	1300
184	ITAJAÍ	Biomassa	395	Biomassa	395	395	395
185	ITAPIRANGA	Óleo Diesel	6761	Etanol	6518	6396	6152
186	ITUPORANGA	Óleo Diesel	388	Elettricidade	233	155	0
187	JACINTO MACHADO	Óleo Diesel	1285	Elettricidade	771	514	0
188	JAGUARUNA	Óleo Diesel	6270	Etanol	6045	5932	5706
189	JARAGUÁ DO SUL	Óleo Diesel	344	Etanol	332	325	313
190	JARAGUÁ DO SUL	Biogás	544	Biogás	544	544	544
191	JARAGUÁ DO SUL	Óleo Diesel	902	Etanol	870	854	821
192	JARAGUÁ DO SUL	Óleo Diesel	1760	Etanol	1696	1665	1601
193	JOAÇABA	Óleo Diesel	51	Etanol	49	48	46
194	JOAÇABA	Óleo Diesel	908	Elettricidade	545	363	0
195	JOINVILLE	Óleo Diesel	145	Etanol	140	137	132
196	JOINVILLE	Óleo Diesel	146	Etanol	141	138	133
197	JOINVILLE	Óleo Diesel	189	Etanol	182	179	172
198	JOINVILLE	Óleo Diesel	577	Etanol	556	546	525
199	JOINVILLE	Óleo Diesel	803	Etanol	774	759	730
200	JOINVILLE	Coque de Carvão Mineral	392	Coque de Carvão Mineral	392	392	392

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
201	JOINVILLE	Coque de Carvão Mineral	385	Coque de Carvão Mineral	385	385	385
202	JOINVILLE	Óleo Diesel	563	Etanol	543	532	512
203	JOINVILLE	Óleo Diesel	215	Etanol	207	203	196
204	JOINVILLE	Biogás	185	Biogás	185	185	185
205	JOINVILLE	Coque de Carvão Mineral	185	Coque de Carvão Mineral	185	185	185
206	JOINVILLE	Óleo Diesel	463	Etanol	446	438	421
207	JOINVILLE	Óleo Diesel	387	Etanol	373	366	352
208	JOINVILLE	Biogás	175	Biogás	175	175	175
209	JOINVILLE	Coque de Carvão Mineral	1335	Coque de Carvão Mineral	1335	1335	1335
210	JOINVILLE	Coque de Carvão Mineral	399	Coque de Carvão Mineral	399	399	399
211	JOINVILLE	Óleo Diesel	594	Etanol	573	562	541
212	JOINVILLE	Óleo Diesel	743	Etanol	716	703	676
213	LAGES	Óleo Diesel	334	Etanol	322	316	304
214	LAGES	Óleo Diesel	495	Etanol	477	468	450
215	LAGES	Óleo Diesel	495	Etanol	477	468	450
216	LAGES	Óleo Diesel	495	Etanol	477	468	450
217	LAGES	Óleo Diesel	510	Etanol	492	482	464
218	LAGES	Óleo Diesel	855	Etanol	824	808	778
219	LAGES	Biogás	302	Biogás	302	302	302
220	LAGES	Óleo Diesel	1614	Etanol	1556	1527	1469
221	LAGES	Óleo Diesel	2152	Etanol	2074	2036	1958
222	LAGES	Biomassa	623	Biomassa	623	623	623
223	LAGES	Óleo Diesel	2402	Etanol	2315	2272	2186
224	LONTRAS	Biomassa	73	Biomassa	73	73	73
225	LONTRAS	Coque de Carvão Mineral	107	Coque de Carvão Mineral	107	107	107
226	LUIS ALVES	Óleo Diesel	438	Etanol	423	415	399
227	LUZERNA	Óleo Diesel	95	Elettricidade	57	38	0
228	LUZERNA	Óleo Diesel	97	Elettricidade	58	39	0
229	MACIEIRA	Óleo Diesel	18	Etanol	17	17	16
230	MAFRA	Óleo Diesel	262	Etanol	253	248	238
231	MAFRA	Óleo Diesel	218	Etanol	210	206	198
232	MAFRA	Óleo Diesel	648	Etanol	625	613	590
233	MARAVILHA	Óleo Diesel	361	Etanol	348	342	329
234	MARAVILHA	Óleo Diesel	632	Etanol	609	598	575
235	MASSARANDUBA	Óleo Diesel	625	Elettricidade	375	250	0
236	MELEIRO	Óleo Diesel	161	Etanol	155	152	146
237	MONDAÍ	Óleo Diesel	183	Elettricidade	110	73	0
238	MORRO DA FUMAÇA	Óleo Diesel	43	Etanol	41	41	39
239	MORRO DA FUMAÇA	Óleo Diesel	155	Etanol	149	146	141
240	MORRO DA FUMAÇA	Óleo Diesel	207	Etanol	199	195	188

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
241	NAVEGANTES	Óleo Diesel	529	Etanol	510	501	481
242	NOVA ERECHIM	Óleo Diesel	12	Elettricidade	7	5	0
243	NOVA ITABERABA	Óleo Diesel	60	Etanol	58	57	55
244	NOVA ITABERABA	Óleo Diesel	225	Etanol	217	213	205
245	NOVA VENEZA	Óleo Diesel	110	Etanol	106	104	100
246	NOVA VENEZA	Coque de Carvão Mineral	112	Coque de Carvão Mineral	112	112	112
247	NOVA VENEZA	Coque de Carvão Mineral	115	Coque de Carvão Mineral	115	115	115
248	NOVA VENEZA	Coque de Carvão Mineral	105	Coque de Carvão Mineral	105	105	105
249	NOVA VENEZA	Óleo Diesel	98	Etanol	94	93	89
250	NOVA VENEZA	Óleo Diesel	121	Etanol	117	114	110
251	ORLEANS	Óleo Diesel	815	Etanol	785	771	741
252	OTACÍLIO COSTA	Óleo Diesel	7988	Etanol	7700	7556	7268
253	OTACÍLIO COSTA	Óleo Diesel	8206	Etanol	7910	7763	7467
254	OTACÍLIO COSTA	Óleo Diesel	8045	Etanol	7755	7610	7320
255	OURO	Óleo Diesel	44	Etanol	42	42	40
256	PAIAL	Óleo Diesel	76	Elettricidade	46	30	0
257	PALHOÇA	Óleo Diesel	123	Etanol	118	116	111
258	PALHOÇA	Óleo Diesel	61	Etanol	59	58	56
259	PALHOÇA	Óleo Diesel	324	Etanol	312	306	295
260	PALHOÇA	Biogás	135	Biogás	135	135	135
261	PALHOÇA	Óleo Diesel	72	Etanol	69	68	66
262	PALHOÇA	Óleo Diesel	140	Etanol	135	132	127
263	PALMEIRA	Óleo Diesel	2513	Etanol	2423	2377	2287
264	PALMITOS	Óleo Diesel	69	Etanol	67	65	63
265	PALMITOS	Óleo Diesel	72	Etanol	69	68	66
266	PALMITOS	Óleo Diesel	71	Etanol	68	67	65
267	PAPANDUVA	Óleo Diesel	70	Etanol	67	66	64
268	PAPANDUVA	Biomassa	65	Biomassa	65	65	65
269	PAPANDUVA	Óleo Diesel	140	Etanol	135	132	127
270	PAPANDUVA	Óleo Diesel	66	Etanol	64	62	60
271	PARAÍSO	Óleo Diesel	31	Etanol	30	29	28
272	PEDRAS GRANDES	Óleo Diesel	45	Etanol	43	43	41
273	PEDRAS GRANDES	Óleo Diesel	111	Etanol	107	105	101
274	PENHA	Óleo Diesel	46	Etanol	44	44	42
275	PENHA	Óleo Diesel	68	Etanol	66	64	62
276	PENHA	Óleo Diesel	149	Etanol	144	141	136
277	PINHALZINHO	Óleo Diesel	89	Etanol	86	84	81
278	PINHALZINHO	Óleo Diesel	194	Etanol	187	184	177
279	PINHALZINHO	Óleo Diesel	201	Etanol	194	190	183
280	PIRATUBA	Óleo Diesel	7	Etanol	7	7	6
281	POMERODE	Óleo Diesel	615	Etanol	593	581	559

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
282	POMERODE	Óleo Diesel	815	Etanol	785	771	741
283	POMERODE	Biomassa	163	Biomassa	163	163	163
284	PORTO UNIÃO	Óleo Diesel	201	Elettricidade	121	80	0
285	PORTO UNIÃO	Óleo Diesel	425	Etanol	410	402	387
286	PORTO UNIÃO	Óleo Diesel	415	Etanol	400	392	378
287	POUSO REDONDO	Óleo Diesel	124	Etanol	120	117	113
288	POUSO REDONDO	Óleo Diesel	120	Etanol	116	113	109
289	QUILOMBO	Óleo Diesel	183	Etanol	176	173	166
290	RIO DAS ANTAS	Óleo Diesel	302	Etanol	291	286	275
291	RIO DO SUL	Biogás	715	Biogás	715	715	715
292	RIO DOS CEDROS	Óleo Diesel	20	Elettricidade	12	8	0
293	RIO NEGRINHO	Óleo Diesel	220	Etanol	212	208	200
294	RIO NEGRINHO	Óleo Diesel	424	Etanol	409	401	386
295	RIO NEGRINHO	Óleo Diesel	976	Etanol	941	923	888
296	RODEIO	Óleo Diesel	6	Etanol	6	6	5
297	RODEIO	Óleo Diesel	9	Etanol	9	9	8
298	RODEIO	Óleo Diesel	18	Etanol	18	17	17
299	SALETE	Óleo Diesel	207	Elettricidade	124	83	0
300	SALTO VELOSO	Óleo Diesel	46	Elettricidade	28	18	0
301	SANGÃO	Óleo Diesel	100	Etanol	96	94	91
302	SANTA CECÍLIA	Óleo Diesel	20	Etanol	19	19	18
303	SANTA CECÍLIA	Óleo Diesel	36	Etanol	35	34	33
304	SANTA CECÍLIA	Óleo Diesel	29	Etanol	28	27	26
305	SANTA CECÍLIA	Óleo Diesel	66	Etanol	64	62	60
306	SANTA CECÍLIA	Óleo Diesel	38	Etanol	37	36	35
307	SANTA CECÍLIA	Óleo Diesel	35	Etanol	34	33	32
308	SANTA CECÍLIA	Óleo Diesel	25	Etanol	24	24	23
309	SÃO BENTO DO SUL	Óleo Diesel	197	Etanol	190	187	180
310	SÃO BENTO DO SUL	Óleo Diesel	298	Etanol	288	282	272
311	SÃO BENTO DO SUL	Óleo Diesel	620	Etanol	598	587	564
312	SÃO FRANCISCO DO SUL	Óleo Diesel	3	Etanol	3	3	3
313	SÃO FRANCISCO DO SUL	Óleo Diesel	2	Etanol	2	2	2
314	SÃO FRANCISCO DO SUL	Óleo Diesel	1	Etanol	1	1	1
315	SÃO FRANCISCO DO SUL	Óleo Diesel	4	Etanol	4	4	3
316	SÃO JOÃO BATISTA	Óleo Diesel	753	Elettricidade	452	301	0
317	SÃO JOÃO DO SUL	Óleo Diesel	49	Etanol	47	46	45
318	SÃO JOSÉ	Óleo Diesel	403	Etanol	388	381	367
319	SÃO JOSÉ	Biogás	155	Biogás	155	155	155

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
320	SÃO JOSÉ	Biogás	164	Biogás	164	164	164
321	SÃO JOSÉ	Óleo Diesel	274	Etanol	264	259	249
322	SÃO LOURENÇO DO OESTE	Biomassa	10030	Biomassa	10030	10030	10030
323	SÃO LOURENÇO DO OESTE	Biomassa	10025	Biomassa	10025	10025	10025
324	SÃO MIGUEL DO OESTE	Óleo Diesel	543	Etanol	523	513	494
325	SÃO MIGUEL DO OESTE	Óleo Diesel	250	Etanol	241	236	227
326	SÃO MIGUEL DO OESTE	Óleo Diesel	759	Etanol	731	718	690
327	SCHROEDER	Óleo Diesel	110	Eleticidade	66	44	0
328	SEARA	Óleo Diesel	400	Etanol	386	378	364
329	SEARA	Óleo Diesel	871	Etanol	839	824	792
330	SIDERÓPOLIS	Óleo Diesel	107256	Etanol	103391	101459	97595
331	SIDERÓPOLIS	Óleo Diesel	92306	Etanol	88980	87317	83991
332	SIDERÓPOLIS	Coque de Carvão Mineral	197338	Coque de Carvão Mineral	197338	197338	197338
333	SOMBRIÓ	Óleo Diesel	15	Etanol	14	14	14
334	SOMBRIÓ	Óleo Diesel	20	Etanol	19	19	18
335	SOMBRIÓ	Óleo Diesel	14	Etanol	13	13	13
336	TAIÓ	Óleo Diesel	251	Etanol	242	237	228
337	TANGARÁ	Óleo Diesel	945	Eleticidade	567	378	0
338	TIJUCAS	Biogás	80	Biogás	80	80	80
339	TIJUCAS	Óleo Diesel	189	Etanol	182	179	172
340	TIMBÓ	Óleo Diesel	183	Etanol	176	173	166
341	TIMBÓ GRANDE	Óleo Diesel	285	Etanol	275	270	259
342	TRÊS BARRAS	Óleo Diesel	57612	Etanol	55536	54498	52422
343	TRÊS BARRAS	Óleo Diesel	15362	Etanol	14808	14532	13978
344	TREVISÓ	Óleo Diesel	39	Etanol	38	37	35
345	TREZE TÍLIAS	Óleo Diesel	760	Etanol	733	719	692
346	TUBARÃO	Óleo Diesel	328	Etanol	316	310	298
347	TUBARÃO	Óleo Diesel	153	Etanol	147	145	139
348	TUBARÃO	Óleo Diesel	286	Etanol	276	271	261
349	TURVO	Óleo Diesel	118	Etanol	114	112	108
350	TURVO	Biomassa	68	Biomassa	68	68	68
351	URUSSANGA	Óleo Diesel	1983	Etanol	1911	1875	1804
352	URUSSANGA	Óleo Diesel	423	Etanol	408	400	385
353	URUSSANGA	Coque de Carvão Mineral	1156	Coque de Carvão Mineral	1156	1156	1156
354	URUSSANGA	Óleo Diesel	356	Etanol	343	337	324
355	URUSSANGA	Coque de Carvão Mineral	900	Coque de Carvão Mineral	900	900	900
356	URUSSANGA	Óleo Diesel	1249	Etanol	1204	1181	1136
357	VARGEM BONITA	Biomassa	476	Biomassa	476	476	476
358	VARGEM BONITA	Óleo Diesel	120	Etanol	116	114	109

Nº	Município	Combustível Atual	Emissões 2022 (tCO ₂ e)	Combustível Proposto	Emissões (tCO ₂ e)		
					2030	2040	2050
359	VARGEM BONITA	Óleo Diesel	98	Etanol	94	93	89
360	VIDAL RAMOS	Óleo Diesel	24	Etanol	23	23	22
361	VIDAL RAMOS	Óleo Diesel	25	Etanol	24	24	23
362	VIDAL RAMOS	Biomassa	16	Biomassa	16	16	16
363	VIDAL RAMOS	Óleo Diesel	15	Etanol	14	14	14
364	VIDEIRA	Óleo Diesel	2854	Etanol	2752	2700	2597
365	VIDEIRA	Biogás	332	Biogás	332	332	332
366	XANXERÊ	Óleo Diesel	160	Etanol	154	151	146
367	XANXERÊ	Óleo Diesel	21	Etanol	20	20	19
368	XANXERÊ	Óleo Diesel	87	Etanol	83	82	79
369	XAXIM	Óleo Diesel	64	Etanol	62	61	58
370	XAXIM	Óleo Diesel	26	Etanol	25	25	24
371	XAXIM	Óleo Diesel	50	Etanol	48	47	45
Total de emissões (tCO ₂ e)			950.971		929.879	919.333	898.241

Fonte: Autor, 2023.

ANEXO A – Resolução CONSEMA 98/2017 – Atividades Nível G

Lista das atividades do Anexo VI da Resolução CONSEMA n° 98/2017, atualizada até a Resolução CONSEMA n° 185/2021 que possuem um potencial poluidor do ar, nível G (Grande).

00 - Extração de minerais

00.10.00 - Lavra a céu aberto com desmonte por explosivo.

00.10.01 - Lavra a céu aberto com desmonte por explosivo, se mineral típico de emprego na construção civil, independente de seu uso.

10 - Indústria de produtos minerais não metálicos

10.40.20 - Fabricação de material cerâmico esmaltado.

10.50.00 - Fabricação de cimento.

10.50.20 - Fabricação de peças, ornatos e estruturas de amianto.

11 - Indústria metalúrgica

11.00.01 - Siderurgia e elaboração de produtos siderúrgicos com redução de minérios - inclusive ferro-gusa.

11.00.02 - Produção de ferro e aço e suas ligas em qualquer forma, sem redução de minério, com fusão.

11.00.06 - Produção de canos e tubos de ferro e aço, com fusão e tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.00.09 - Produção de fundidos de ferro e aço em forno cubilot, sem tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.00.10 - Produção de fundidos de ferro e aço em forno cubilot, com tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.10.00 - Metalurgia dos metais não-ferrosos em formas primárias - inclusive metais preciosos.

11.11.01 - Produção de ligas de metais não-ferrosos em formas primárias - inclusive metais preciosos.

11.11.02 - Produção de laminados de metais e de ligas de metais não-ferrosos (placas, discos, chapas lisas ou corrugadas, bobinas, tiras e fitas, perfis, barras redondas, chatas ou quadradas, vergalhões), com fusão - exceto canos, tubos e arames.

11.11.04 - Produção de canos e tubos de metais não-ferrosos - inclusive ligas, com fusão e com tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.11.05 - Produção de canos e tubos de metais não-ferrosos - inclusive ligas, com fusão e sem tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.11.08 - Produção de formas, moldes e peças fundidas de metais não-ferrosos – inclusive ligas, em forno cubilot com tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11.11.09 - Produção de formas, moldes e peças fundidas de metais não-ferrosos – inclusive ligas, em forno cubilot sem tratamento químico superficial ou galvanotécnico.

11 11 12 - Produção de fios e arames de metais e de ligas de metais não-ferrosos – inclusive fios, cabos e condutores elétricos, com fusão.

11.20.00 - Metalurgia do pó - inclusive peças moldadas.

12 - Indústria mecânica

12.10.00 - Fabricação de máquinas, aparelhos, peças e acessórios com tratamento químico superficial ou galvanotécnico ou fundição ou pintura por aspersão, ou esmaltação ou imersão.

13 - Indústria de material elétrico e comunicações

13.10.00 - Fabricação de pilhas, baterias e acumuladores.

14 - Indústria de material de transporte

14.30.00 - Fabricação ou montagem de veículos rodoviários, aeroviários e navais.

17 - Indústria de papel e papelão

17.11.00 - Fabricação de celulose.

20 - Indústria química

20.10.00 - Fabricação de produtos derivados do processamento do petróleo, de rochas oleígenas e do carvão mineral.

20.30.00 - Fabricação de adubos, fertilizantes e corretivos de solo.

20.60.00 - Fabricação de tintas, esmaltes, lacas, vernizes, impermeabilizantes, solventes e secantes.

20.70.00 - Produção de óleos, gorduras e ceras vegetais e animais, em bruto, de óleos de essências vegetais e outros produtos de destilação da madeira - exceto refinação de produtos alimentares.

20.70.10 - Recuperação e refino de solventes, óleos minerais, vegetais e animais.

22 - Indústria do refino de petróleo e destilação do álcool

22.21.00 - Refino do petróleo e produção de álcool por processamento de cana de açúcar, mandioca, madeira e outros vegetais.

26 - Indústria de produtos alimentares

26.94.00 - Fabricação de rações balanceadas e de alimentos preparados para animais
- inclusive farinhas de carne, sangue, osso, peixe e pena.

30 - Indústrias diversas

30 20 00 Usinas de produção de concreto asfáltico.

30.60.00 - Fabricação de carvão ativado e cardiff.

30.60.10- Fabricação de carvão vegetal.

34 - Serviços de infraestrutura

34.11.00 - Produção de energia termoeletrica.

34.11.05 - Produção de energia termoeletrica a partir de gás natural.

34.41.09 - Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com ou sem reaproveitamento energético.

34.41.11 - Tratamento térmico de resíduos de serviços de saúde.

47 - Transportes e terminais

47.10.10 - Transporte rodoviário de produtos perigosos, resíduos perigosos ou rejeitos perigosos, exclusivamente no território catarinense.

47.82.01 - Aeroportos.

47.83.02 - Terminal de petróleo.

47.83.03 - Terminal de produtos químicos.

47.85.00 - Terminal ferroviário de carga.

71 - Atividades diversas

71.21.10 - Loteamento com fins industriais e comerciais.

71.21.11 - Condomínio com fins industriais ou de serviços (multissetorial).

71.30.00 - Unidade de reciclagem de resíduos Classe I.

71.40.01 - Unidade de descaracterização, com ou sem descontaminação, com ou sem reciclagem de lâmpadas.

71.40.02 - Unidade móvel de tratamento de resíduos, sem que ocorra emissão de efluentes gasosos.

71.60.00 - Tratamento térmico de resíduos industriais, com ou sem aproveitamento energético.

71.60.03 - Disposição final de rejeitos Classe I, de qualquer origem.

71.60.07 - Unidade de mistura e pré-condicionamento de resíduos industriais Classe I e Classe IIA para fins de coprocessamento.

71.60.09 - Destinação final de rejeitos e efluentes, Classe I, oriundos de outros estados, em aterros, ou por incineração sem aproveitamento energético ou para tratamento de

efluentes.

71.60.11 - Destinação final de rejeitos e efluentes, Classe IIA, oriundos de outros Estados, em aterros, ou por incineração sem aproveitamento energético ou para tratamento de efluentes.

71 90 02 Crematórios.