

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

GLEND FAUTH

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA
PROVENIENTES DE COMPOSTAGEM**

FLORIANÓPOLIS

2024

GLENDA FAUTH

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA
PROVENIENTES DE COMPOSTAGEM**

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

Coorientador: Prof Dr. Juliano
da Cunha Gomes

FLORIANÓPOLIS

2024

CDD 551.6
F269a

Fauth, Glenda

Análise dos impactos das emissões de gases de efeito estufa provenientes de compostagem [DIS] / Glenda Fauth; orientação de Cássio Aurélio Suski; coorientação de Juliano da Cunha Gomes – Florianópolis, 2024.

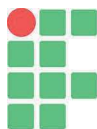
1 v.: il.

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

Inclui referências.

1. Mudanças climáticas. 2. Gestão de resíduos. 3. Compostagem. 4. Gases de efeito estufa. 5. Aquecimento global. I. Suski, Cássio Aurélio. II. Gomes, Juliano da Cunha. III. 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): *Glenda Fauth*

Título:	ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PROVENIENTES DE COMPOSTAGEM
----------------	--

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



Documento assinado digitalmente
CASSIO AURELIO SUSKI
Data: 25/10/2024 16:29:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr(a). Cássio Aurélio Suski

Orientador(a) / Presidente / IFSC / Itajaí – SC
Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência
☒ Aprovado ☐ Reprovado



Documento assinado digitalmente
DANIEL SAMPAIO CALEARO
Data: 29/10/2024 15:21:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr(a). Daniel Sampaio Calearo

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC
Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência
☒ Aprovado ☐ Reprovado



Documento assinado digitalmente
FERNANDA SIMONI SCHUCH
Data: 30/10/2024 17:06:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr(a). Fernanda Simoni Schuch

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC
Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência
☒ Aprovado ☐ Reprovado



Documento assinado digitalmente
Armando Borges de Castilhos Junior
Data: 26/10/2024 09:27:36-0300
CPF: ***.091.499-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr(a). Armando Borges de Castilhos Junior

Avaliador(a) Externo / UFSC / Florianópolis - SC
Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência
☒ Aprovado ☐ Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

- () maioria simples
(X) unanimidade

Itajaí, 25 de outubro de 2024



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, Elvin, e à minha irmã, Graziela, pelo amor incondicional e apoio em todos os momentos da minha vida. Ao meu pai do coração, Alberto, que durante esse período, se tornou a estrela mais brilhante no céu, sempre me guiando.

Ao Rodolfo, meu companheiro, por todo o suporte e ajuda prática que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Desde a montagem da leira, as idas ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), a busca pela palha em Tubarão e, principalmente, por estar sempre ao meu lado, me incentivando e apoiando durante toda essa jornada.

À Raísa, minha melhor amiga, por me escutar nos momentos de desabafo e, sobretudo, por me motivar a seguir firme.

Aos meus colegas de mestrado, pela parceria, troca de conhecimentos e apoio mútuo durante todo o curso. Aos meus colegas de trabalho, pela compreensão e incentivo ao longo desse período desafiador.

Ao professor Cássio, meu orientador, por sua orientação, paciência e valiosas contribuições, além de disponibilizar o Optima 7, instrumento essencial para a realização desta pesquisa. Ao Juliano, meu coorientador, pela colaboração e insights que enriqueceram este trabalho e por ceder o LATA, Laboratório do IFSC Garopaba, que foi fundamental para as etapas experimentais. À Dra. Débora e ao bolsista Pedro, pelo apoio nas conversões complexas e pelas dicas que tanto contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e ao Programa de Mestrado em Clima e Ambiente, pela infraestrutura e apoio acadêmico que tornaram esta pesquisa possível.

Minha imensa gratidão a todos por terem feito parte dessa etapa tão importante da minha vida.

RESUMO

As mudanças climáticas são um desafio global, e o gerenciamento de resíduos sólidos contribui para a emissão de gases de efeito estufa (GEE). A compostagem surge como uma solução para reduzir as emissões, especialmente de metano (CH_4), provenientes de aterros sanitários. No entanto, o processo de compostagem também gera GEE, e seu impacto no aquecimento global ainda não é completamente compreendido. Este estudo visa avaliar o impacto das emissões de GEE da compostagem no aquecimento global, utilizando o município de Garopaba como estudo de caso. A quantidade de resíduos orgânicos gerados em Garopaba foi determinada com base em dados oficiais do Plano Municipal de Saneamento Básico e do Plano Estadual de Resíduos Sólidos. Entre 2017 e 2022, a geração de resíduos orgânicos aumentou 10,8%, totalizando 5.409,01 toneladas em 2022, ano-base da análise. A quantificação das emissões de GEE foi realizada em duas etapas. Na primeira, medições em uma leira de compostagem revelaram aumentos nas concentrações de CO_2 e CH_4 durante período de elevada precipitação, sugerindo condições anaeróbicas. Foi determinado um fator de emissão de CH_4 de 0,00086 tCH_4/t de resíduo compostado. Na segunda etapa, diferentes cenários de destinação de resíduos foram analisados com a ferramenta GHG Protocol, avaliando o impacto da transição do aterro para a compostagem nas emissões de GEE. Os resultados indicam que, ao substituir gradualmente o envio de resíduos orgânicos para aterros pela compostagem, seria possível reduzir as emissões totais de GEE em até 88,7%. A análise também demonstrou que o fator de emissão específico, calculado para as condições locais, resultou em estimativas de emissões significativamente menores, até 137,5% mais baixas do que as obtidas utilizando o fator padrão do IPCC. Por fim, a avaliação do impacto dessas emissões na temperatura global mostrou uma variação muito pequena, com reduções estimadas entre $-0,00026^\circ\text{C}$ e $-0,00104^\circ\text{C}$. Apesar de a compostagem resultar em reduções nas emissões de GEE, seu impacto direto na mitigação do aquecimento global pode variar conforme a escala e a extrapolação dos dados.

Palavras-Chave: Mudanças Climáticas. Gestão de Resíduos. Compostagem. Gases de Efeito Estufa. Aquecimento Global.

ABSTRACT

Climate change is a global challenge, and solid waste management contributes to greenhouse gas (GHG) emissions. Composting emerges as a solution to reduce emissions, particularly methane (CH₄) from landfills. However, the composting process also generates GHGs, and its impact on global warming is not yet fully understood. This study aims to assess the impact of GHG emissions from composting on global warming, using the municipality of Garopaba as a case study. The amount of organic waste generated in Garopaba was determined based on official data from the Municipal Basic Sanitation Plan and the State Solid Waste Plan. Between 2017 and 2022, the generation of organic waste increased by 10.8%, totaling 5,409.01 tons in 2022, the base year for analysis. GHG emissions were quantified in two stages. In the first, measurements at a composting windrow revealed increases in CO₂ and CH₄ concentrations during periods of heavy rainfall, suggesting anaerobic conditions. A CH₄ emission factor of 0.00086 tCH₄/t of composted waste was determined. In the second stage, different waste disposal scenarios were analyzed using the GHG Protocol tool, assessing the impact of transitioning from landfills to composting on GHG emissions. The results indicate that by gradually replacing the disposal of organic waste in landfills with composting, total GHG emissions could be reduced by up to 88.7%. The analysis also demonstrated that the specific emission factor calculated for local conditions resulted in significantly lower emissions estimates, up to 137.5% lower than those obtained using the IPCC standard factor. Finally, the assessment of the impact of these emissions on global temperatures showed a very small variation, with estimated reductions ranging from -0.00026°C to -0.00104°C. Although composting leads to GHG emission reductions, its direct impact on global warming mitigation is limited, especially on a local scale.

Keywords: Climate Change. Waste Management. Composting. Greenhouse Gases. Global Warming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo do efeito estufa na superfície e atmosfera terrestre	19
Figura 2- Concentração de GEE na atmosfera e temperatura da superfície global observada.....	21
Figura 3 - Composição Gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil.....	24
Figura 4 - Composição gravimétrica dos RSU no Estado de SC	25
Figura 5 - Processo de compostagem, considerando o método em leiras estáticas com aeração passiva.....	27
Figura 6 - Variação da temperatura na leira em função do tempo de compostagem	29
Figura 7 - Emissões de GEE no Brasil, de 1990 a 2021, por setor	33
Figura 8 - Porcentagem de emissões de GEE brasileiras, por setor, em 2021 e 2022	34
Figura 9 - Emissões totais de CO ₂ e de 1990 a 2019 por unidade federativa	36
Figura 10 - Distribuição das emissões do setor de resíduos	37
Figura 11 - Impacto estimado nas emissões de gases de efeito estufa provenientes de resíduos, com o ano-base de 2020	38
Figura 12 - Emissões de CO ₂ e temperatura para cenários baseados em SSP ao longo do século XXI	43
Figura 13 - Categorias, limites de aquecimento e cenários de emissões.....	43
Figura 14 - Mudança da temperatura nos diferentes níveis do aquecimento global .	44
Figura 15 - Fluxograma das etapas realizadas	45
Figura 16 - Mapa de Localização e Perímetro Urbano de Garopaba.	46
Figura 17 - Montagem da leira de compostagem	48
Figura 18 - Câmara de amostragem para medição de GEE	49
Figura 19 – Analisador Portátil Optima 7	50
Figura 20 – Ferramenta de cálculo de emissões do Programa Brasileiro GHG Protocol	52
Figura 16 - Revolvimento superficial durante a fase termofílica	55
Figura 17- Passo a passo da montagem da leira de compostagem.....	56
Figura 23- Composto orgânico da leira de compostagem de estudo em 12/04/2024	57
Figura 24 - Câmara de amostragem para medição de GEE inseridas na leira de compostagem.....	58

Figura 25 - Medição de GEE na leira de compostagem utilizando o analisador portátil Optima 7	59
Figura 23 - Cenários propostos para fins de cálculos de emissões na ferramenta GHG Protocol	64
Figura 27 - Concentrações de CO ₂ (%) no Ponto 1 durante o período analisado	73
Figura 28 - Concentrações de CO ₂ (%) no Ponto 2 durante o período analisado	73
Figura 29 - Concentrações de CO ₂ (%) no Ponto 3 durante o período analisado	74
Figura 30 - Mapa do acumulado de precipitação (mm) em outubro de 2023	76
Figura 31 - Concentrações de CH ₄ (%) no Ponto 1 durante o período analisado	77
Figura 32 - Concentrações de CH ₄ (%) no Ponto 2 durante o período analisado	78
Figura 33 - Concentrações de CH ₄ (%) no Ponto 3 durante o período analisado	78
Figura 34 - Concentrações de CO ₂ e CH ₄ no Ponto 1	79
Figura 34 - Comparação dos fatores de emissão de metano (g CH ₄ .t ⁻¹), considerando dados da literatura (referências deste estudo)	82
Figura 35 - Gráfico comparativo dos resultados obtidos na ferramenta GHG Protocol	89
Figura 36 - Resultados no cenário comparativo com os diferentes fatores de emissão de CH ₄	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do GWP dos gases de efeito estufa, segundo o AR5	20
Tabela 2 - Quantidade de resíduos orgânicos compostados na montagem da leira e por abastecimento	56
Tabela 3 - Quantidades de resíduos destinados ao aterro sanitário e à compostagem em cada um dos cenários propostos.....	64
Tabela 4 - Estimativa da quantidade de resíduos por fração em Garopaba – SC.....	69
Tabela 5 - Fatores de emissão de CH ₄ calculados nos Pontos 1, 2 e 3	81
Tabela 6 - Comparação dos fatores de emissão de metano em diferentes técnicas de compostagem, quantidade de resíduos e metodologias de medição	83
Tabela 7 - Quantidade de resíduos e emissões de GEE nos diferentes cenários.....	86
Tabela 8 - Resultados no cenário comparativo com os diferentes fatores de emissão de CH ₄	91
Tabela 9 - Redução nas Concentrações de GEE (ppm) na atmosfera e Variação de Temperatura (ΔT) em Garopaba e Globalmente	94

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDM	<i>Clean Development Mechanism</i>
CFC	Clorofluorcarbonetos
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
COP	Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
CH ₄	Gás metano
EF _{CH4}	Fator de Emissão do gás metano
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	<i>Greenhouse Gases</i>
GIRS	Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HFCs	Hidrofluorcarbonetos
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
N ₂ O	Óxido nitroso
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PERS/SC	Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina
PIUP	Processos Industriais e Uso de Produtos
PFCs	Perfluorcarbonetos
Planares	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PMSG	Plano Municipal de Saneamento Básico de Garopaba
PNMC	Política Nacional de Mudança do Clima
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SC	Estado de Santa Catarina
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivo(s) Específico(s)	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS, EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL.....	18
2.2	RESÍDUOS SÓLIDOS	22
2.3	COMPOSTAGEM	26
2.3.1	Métodos de Compostagem	29
2.4	EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL	32
2.4.1	Emissões de GEE no setor de resíduos, em compostagem e aterros sanitários	36
2.5	INFLUÊNCIA DOS GEE NO AQUECIMENTO GLOBAL	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1	ÁREA DE ESTUDO	46
3.2	MATERIAIS.....	47
3.2.1	Materiais utilizados para o experimento de compostagem.....	47
3.2.2	Equipamento utilizado para a medição das concentrações de GEE ..	49
3.2.3	Software utilizado	51
3.3	MÉTODOS	52
3.3.1	Levantamento da geração de resíduos sólidos no município de Garopaba	53
3.3.2	Quantificação das emissões de gases de efeito estufa	54
3.3.3	Determinação da influência dos gases de efeito estufa, provenientes de compostagem, no aquecimento global.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1	LEVANTAMENTO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO DE GAROPABA	69
4.2	QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA ..	72

4.2.1	Quantificação e análise das concentrações de GEE em leira de compostagem.....	72
4.2.2	Estimativa e análise das emissões de GEE por meio da ferramenta GHG Protocol	86
4.3	DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS GASES DE EFEITO ESTUFA, PROVENIENTES DE COMPOSTAGEM, NO AQUECIMENTO GLOBAL	94
5	PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S)	97
5.1	ESTÁGIO DOCÊNCIA - AULAS PARA A TURMA DE GESTÃO AMBIENTAL DO CAMPUS IFSC GAROPABA	97
5.2	SUBMISSÃO DE ARTIGO CIENTÍFICO PARA PUBLICAÇÃO	98
5.3	RELATÓRIO TÉCNICO PARA A PREFEITURA MUNICIPAL DE GAROPABA.....	99
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
	REFERÊNCIAS.....	102
	ANEXO I – PRODUTO I: PLANOS DE AULA ESTÁGIO DOCÊNCIA.....	109
	ANEXO II – RELATÓRIO TÉCNICO ENTREGUE À PREFEITURA MUNICIPAL DE GAROPABA	115

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são uma realidade inegável e representam um dos maiores desafios que a humanidade enfrenta atualmente. O aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) é o principal fator responsável pelo aquecimento global observado nas últimas décadas (IPCC, 2021).

De acordo com o IPCC (2023) a temperatura da superfície da Terra está 1,1°C maior no período de 2011–2020 do que em 1850–1900. E as emissões de GEE continuam a aumentar, com contribuições históricas decorrentes do uso insustentável de energia e da terra, estilo de vida e padrões de consumo da humanidade, igualmente insustentáveis. Os principais gases responsáveis pelas mudanças climáticas são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O).

As consequências das mudanças climáticas são diversas e podem afetar diretamente a vida humana, a biodiversidade e os ecossistemas. Entre as principais consequências, pode-se destacar o aumento da temperatura média global, o derretimento das calotas polares e das geleiras, o aumento do nível do mar, a acidificação dos oceanos, a intensificação de eventos climáticos extremos, como furacões, secas e enchentes, e a perda de biodiversidade (IPCC, 2021). Comunidades vulneráveis que historicamente contribuíram menos para a mudança climática atual são afetadas de forma desproporcional (IPCC, 2023).

Dentre as atividades emissoras de GEE está o gerenciamento de resíduos sólidos. Em 2022, o setor de resíduos foi responsável pela emissão de 91,3 milhões de toneladas de CO₂e no Brasil, sendo responsável por 4% das emissões de GEE no País, tendo o gás metano como o principal contribuinte nas suas emissões (SEEG, 2023). Dependendo das rotas tecnológicas que os municípios adotam para o gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), podem ser um emissor significativo ou um setor estratégico para redução de emissões (Brasil, 2021). A decomposição dos resíduos orgânicos em aterros sanitários, por exemplo, produz metano, um gás de efeito estufa 28 vezes mais potente do que o dióxido de carbono (IPCC, 2013).

Nesse sentido, as soluções com maior potencial de redução de emissões voltadas para resíduos sólidos são através da redução gradativa de resíduos orgânicos em aterros sanitários (Brasil, 2021). Uma das soluções para reduzir a

quantidade de RSU depositados em aterros sanitários é a adoção da compostagem. Por ser um processo aeróbio a compostagem gera baixas quantidades de metano por tonelada de resíduo orgânico em comparação com formas de tratamento anaeróbio, como a disposição em aterros sanitários (Amlinger; Peyr; Cuhls, 2008). Segundo Inácio, Bettio e Miller (2010) a contribuição da compostagem para mitigação das emissões de metano em sistemas de tratamento e gerenciamento de resíduos orgânicos é evidente, pois apresentou significativa diferença quanto às emissões de metano quando comparado aos valores do aterro sanitário, emitindo quantidade aproximadamente 10 vezes menor.

Diante da problemática das mudanças climáticas e de alta geração diária de resíduos, uma nova gestão de RSU faz-se necessária, valorizando principalmente a fração orgânica, que através da compostagem produz o composto orgânico, insumo agrícola essencial à prática da agricultura nas cidades (Abreu, 2013). A compostagem apresenta grande potencial como estratégia de mitigação das emissões de GEE em sistemas de tratamento e destinação de resíduos sólidos.

Para que se atinja o desenvolvimento sustentável, Inácio e Miller (2009) ressaltam que a compostagem será indispensável, pois representa a reciclagem dos nutrientes que nos alimentam e da matéria orgânica que mantém os solos vivos e produtivos. Sendo assim, precisa-se insistir em melhorar o conhecimento e a prática sobre compostagem, métodos de avaliação e monitoramento da qualidade dos resíduos e compostos gerados, bem como sua contribuição para a mitigação de emissões de GEE.

Embora evitar as emissões de CH_4 dos aterros sanitários seja uma das motivações para a compostagem de resíduos orgânicos, o próprio processo de compostagem emite GEE, e essas emissões ainda não são bem compreendidas. As emissões de GEE desempenham um papel importante nas mudanças climáticas globais, e o processo de compostagem, uma prática considerada sustentável de gestão de resíduos orgânicos, pode tanto contribuir para quanto mitigar essas emissões.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o impacto das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes de compostagem no aquecimento global, com base em um estudo de caso que utiliza o método UFSC de compostagem.

1.1.2 Objetivo(s) Específico(s)

- a) Determinar a quantidade dos resíduos orgânicos gerados no município de Garopaba;
- b) Quantificar e analisar as emissões de gases de efeito estufa provenientes da compostagem;
- c) Estimar a influência dos gases de efeito estufa, provenientes de compostagem, no aquecimento global.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

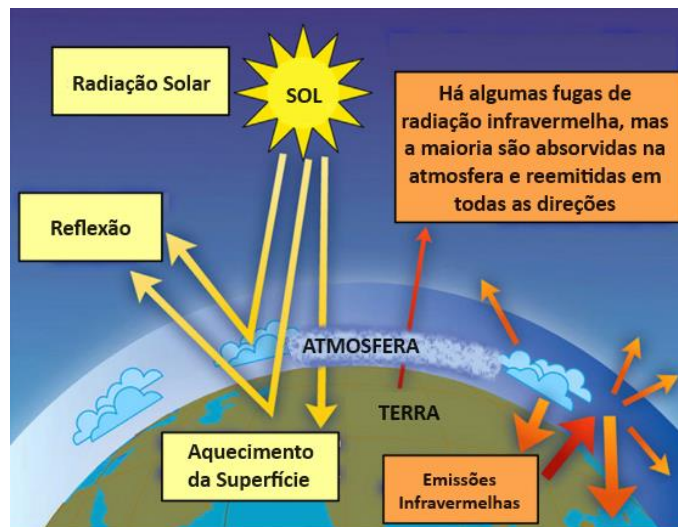
2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS, EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL

As mudanças climáticas têm sido amplamente discutidas no mundo todo e representam o maior desafio enfrentado pela humanidade atualmente. No Brasil, a Política Nacional de Mudança do Clima (PNMC) – Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009 – define a mudança do clima como as alterações climáticas que podem ser atribuídas direta ou indiretamente à atividade humana, resultantes de variação na composição da atmosfera terrestre, sendo acrescidas à variabilidade climática natural observada em longos períodos que se possa comparar (Brasil, 2009).

De acordo com o IPCC (2023), as mudanças climáticas são as alterações no estado do clima que podem ser identificadas, por exemplo, por meio de testes estatísticos, evidenciando mudanças na média e/ou na variabilidade de suas propriedades, e que persistem por um período prolongado, geralmente décadas ou mais. Essas mudanças podem ser resultado de processos naturais internos ou de forças externas, como variações nos ciclos solares, erupções vulcânicas e alterações antropogênicas contínuas na composição da atmosfera ou no uso da terra.

O efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre no planeta, responsável por manter a temperatura média da superfície terrestre em níveis adequados para a vida. A radiação solar atravessa a atmosfera, aquecendo a superfície da Terra. Em resposta, essa energia é reemitida na forma de infravermelho, sendo em grande parte absorvida pelo CO₂ e vapor d'água presentes na atmosfera, formando uma espécie de estufa ao redor do planeta. Sem esse efeito estufa natural, a temperatura média da superfície seria de aproximadamente -21°C (Anderson; Hawkins; Jones, 2016). A Figura 1 ilustra o processo do efeito estufa.

Figura 1 - Processo do efeito estufa na superfície e atmosfera terrestre



Fonte: Adaptado de Anderson, Hawkins e Jones (2016)

De acordo com Lacerda e Nobre (2010), o aquecimento global, refere-se ao aumento da temperatura da Terra, impulsionado pela intensificação do efeito estufa, que envolve a retenção parcial da radiação infravermelha térmica emitida pelo planeta pelos componentes da atmosfera, ou seja, alguns gases presentes na atmosfera terrestre reagem quando expostos à radiação solar, acumulando calor. Esses gases, responsáveis por esse processo de absorção da radiação solar, foram definidos como *Greenhouse Gases* (GHG) em inglês, ou Gases do Efeito Estufa (GEE) em português (IPCC, 2013). A origem antropogênica desse fenômeno está ligada ao aumento na concentração de GEE na atmosfera, com o dióxido de carbono (CO_2) sendo o mais prevalente, e gerado, principalmente, por atividades humanas (Lacerda; Nobre, 2010).

O Protocolo de Kyoto, o primeiro acordo internacional firmado durante a 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada em Kyoto, Japão, em 1997, definiu os sete principais gases causadores do aumento do efeito estufa. Esses gases incluem: Dióxido de Carbono (CO_2); Óxido nitroso (N_2O); Metano (CH_4); Clorofluorcarbonetos (CFC); Hidrofluorcarbonetos (HFCs); Perfluorcarbonetos (PFCs); e Hexafluoreto de enxofre (SF_6).

Cada gás de efeito estufa é capaz de reter calor em determinada intensidade. Essa relação pode ser expressa através do potencial de aquecimento global de cada gás, ou GWP (*Global Warming Potential*, em inglês), sendo que tal capacidade pode ser comparada à capacidade do dióxido de carbono (CO_2) de realizar a mesma

função, ou seja, o CO₂ é utilizado como gás de referência, tendo um GWP de 1 (um) (IPCC, 2013). Tais valores de referência são apresentados nos relatórios do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, em inglês). A Tabela 1 apresenta os potenciais de aquecimento dos principais GEE disponíveis no Relatório AR5.

Tabela 1 - Valores do GWP dos gases de efeito estufa, segundo o AR5

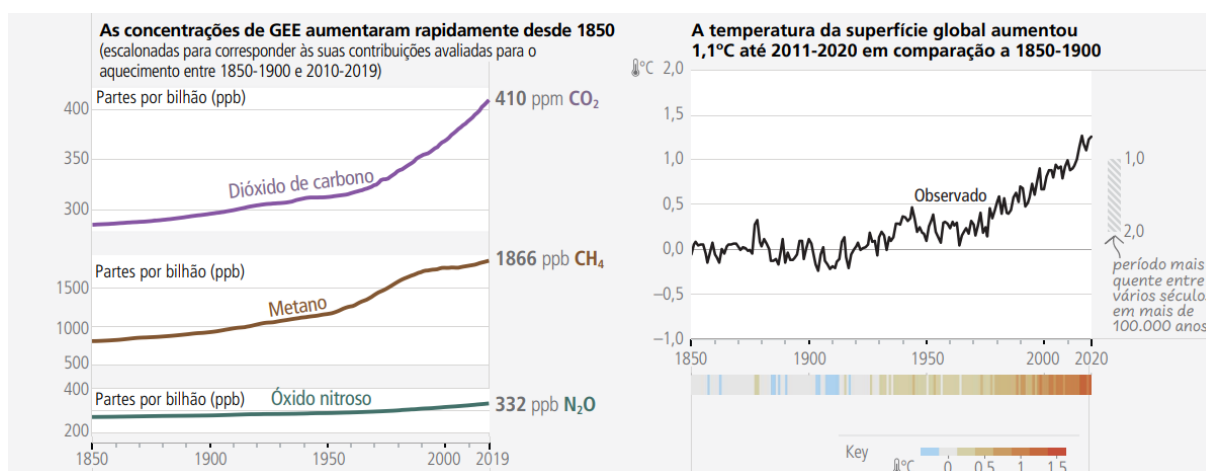
Gases de Efeito Estufa	Fórmula Química	GWP
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	28
Óxido nitroso	N ₂ O	265
Hidrofluorcarbonetos	HFC-23	12.400
Hexafluoreto de enxofre	SF ₆	23.500

Fonte: IPCC (2013)

As causas do agravamento do efeito estufa e seus impactos sobre as mudanças climáticas têm sido objeto de estudos com o objetivo de desenvolver soluções e evitar danos maiores ao meio ambiente e à saúde da população mundial. Nesse contexto, 195 países assinaram um plano para reduzir as emissões de CO₂ e outros gases do efeito estufa, visando limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2°C. Esse plano foi estabelecido no final de 2015 durante a 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 21) e ficou conhecido como o Acordo de Paris (Anderson; Hawkins; Jones, 2016).

Publicações científicas têm, consistentemente, apontado para a realidade das mudanças climáticas globais, impulsionadas pelo aumento na concentração atmosférica de GEE, com o dióxido de carbono (CO₂) destacando-se como o principal contribuinte, seguido pelo metano (CH₄) e os óxidos nitrosos (N₂O). As atividades humanas, especialmente através das emissões desses gases, têm desempenhado um papel inegável no aquecimento global e no aumento da temperatura global, conforme Figura 2 (IPCC, 2023).

Figura 2- Concentração de GEE na atmosfera e temperatura da superfície global observada



Fonte: IPCC (2023)

Durante o período de 2011 a 2020, a temperatura média da superfície global subiu 1,1°C em comparação com o período de 1850 a 1900. No intervalo entre 2010 e 2019, as emissões globais de gases de efeito estufa continuaram a aumentar (IPCC, 2023). A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado a busca por soluções e medidas mitigadoras em diferentes esferas da sociedade. No entanto, a complexidade e a interconexão dos sistemas naturais e sociais exigem abordagens multidisciplinares e colaborativas para enfrentar esse desafio global. Além das iniciativas governamentais e políticas, a mobilização da sociedade civil, o avanço tecnológico e a adoção de práticas sustentáveis são fundamentais para promover a transição para uma economia de baixo carbono e resiliente às mudanças climáticas.

De acordo com os estudos científicos divulgados pelo IPCC, as emissões globais de gases de efeito estufa precisam diminuir em 43% até 2030, em comparação com os níveis registrados em 2019, a fim de reduzir significativamente o risco de colapso e estabilizar o aumento da temperatura global em 1,5°C (IPCC, 2023). Essa urgência na redução das emissões de gases de efeito estufa também se relaciona diretamente com a gestão de resíduos sólidos. A decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos em aterros sanitários é uma fonte significativa de metano, que conforme apontado anteriormente, é um potente GEE.

Luiz (2022) aponta que em relação ao tratamento e disposição final de resíduos sólidos, a principal alternativa deve ser o tratamento diferenciado destes resíduos, aplicando-se técnicas de recuperação que visem a redução das emissões provocadas

pela decomposição orgânica, promovendo tratamento em ambientes controlados, além do reaproveitamento de recicláveis secos e recuperação energética dos rejeitos. Portanto, estratégias eficazes de gestão de resíduos, como a compostagem de resíduos orgânicos e a reciclagem de materiais, não apenas reduzem a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários, mas também contribuem para a mitigação das mudanças climáticas, diminuindo as emissões de gases de efeito estufa.

Apesar de responder por um percentual relativamente pequeno no total de emissões globais de GEE (4-5%), a gestão adequada de resíduos consegue mitigar um volume considerável de emissões, a partir das boas práticas e da disponibilidade das infraestruturas necessárias. O potencial de descarbonização na destinação final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, levando-se em conta o atingimento das metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) para 2040 é de: 30.153.129 t CO₂e (ABRELPE, 2022).

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

O termo resíduo sólido é definido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), como:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível” (Brasil, 2010).

Entende-se, desta forma, que resíduo sólido é o material que foi descartado, porém ainda assim pode ser aproveitado, e, quando esgotadas todas as possibilidades de aproveitamento deste material, o mesmo torna-se um rejeito.

A PNRS determina a seguinte ordem de prioridade na gestão dos resíduos: a não geração; minimização da quantidade de resíduos produzidos; valorização dos resíduos através da reutilização e reciclagem; e destinação para os aterros sanitários somente o que não for mais passível de recuperação (Brasil, 2010).

Conforme estabelecido pela NBR 10.004 da ABNT (2004), os resíduos são categorizados como perigosos (Classe I) quando representam ameaças à saúde pública e ao ambiente e exibem pelo menos uma das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, toxicidade, reatividade ou patogenicidade. Os resíduos não perigosos (Classe II) são aqueles que não apresentam características que constituam um perigo para as pessoas que lidam com eles ou para o ambiente.

Além disso, essa norma divide a Classe II em dois subgrupos: Resíduos Classe II A - Não inertes, que podem ter propriedades que os tornam biodegradáveis, combustíveis ou solúveis em água, e Resíduos Classe II B - Inertes, que consistem em materiais que não sofrem transformação química, física ou biológica quando em contato com água (ABNT, 2004).

A gestão convencional de resíduos concentra-se principalmente na coleta, processamento (tratamento, compostagem e incineração) e disposição ou aterramento de resíduos. Uma mudança de paradigma das práticas convencionais de gestão de resíduos para a Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (GIRS) é crucial para as atividades de desenvolvimento das cidades e para a saúde da comunidade por meio da gestão eficaz dos fluxos de resíduos. A GIRS é um programa abrangente de prevenção de resíduos, reciclagem, compostagem e, por fim, a disposição em aterros sanitários (Gichamo; Gökçekuş, 2019).

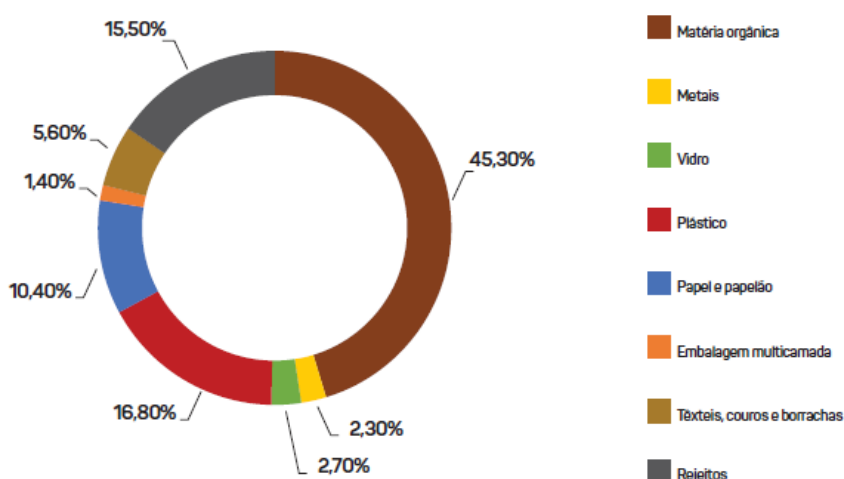
A PNRS, classifica também os resíduos de acordo com sua origem, categorizando os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) como:

- a) resíduos domiciliares, oriundos de atividades domésticas em residências urbanas, e;
- b) resíduos de limpeza urbana, provenientes da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, além de outros serviços de limpeza urbana (Brasil, 2010).

A composição dos RSU é variável, de acordo com a época do ano e do mês, a cultura e o poder aquisitivo da população do município, entre outros fatores. Para Naime (2005) os RSU apresentam grande diversidade e complexidade, podendo alguns fatores interferirem na geração deles, como fatores econômicos, sociais, geográficos, educacionais, culturais e legais, tanto em relação à quantidade gerada como na composição gravimétrica.

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2022), o país gerou aproximadamente 81 milhões de toneladas de RSU no ano mencionado, resultando em uma produção média de 1,043 kg por habitante por dia. De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), no Brasil, a fração orgânica, que inclui sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras, representa a maior parte dos RSU, totalizando 45,3%. Os resíduos recicláveis secos correspondem a 33,6% do total, compreendendo principalmente plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidros (2,7%), metais (2,3%) e embalagens multicamadas (1,4%). Outros resíduos constituem 21,1% do total, sendo que os resíduos têxteis, couros e borrachas representam 5,6%, enquanto os rejeitos, compostos principalmente por resíduos sanitários, somam 15,5% (Brasil, 2022a). A Figura 3 apresenta o gráfico da composição gravimétrica média dos RSU no Brasil, segundo o Planares.

Figura 3 - Composição Gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil



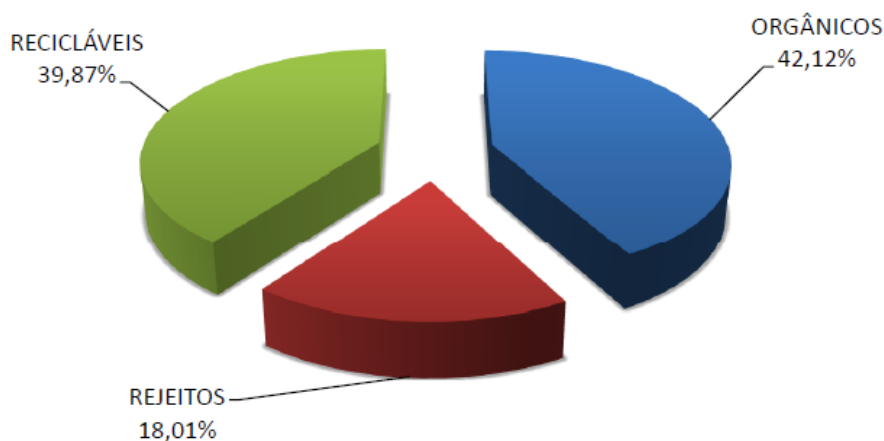
Fonte: BRASIL (2022b)

No Brasil, a maioria dos RSU coletados (61%) ainda é direcionada para aterros sanitários, totalizando 46,4 milhões de toneladas encaminhadas para uma destinação ambientalmente adequada em 2022. Entretanto, áreas de disposição inadequada, como lixões e aterros controlados, continuam em operação em todas as regiões do país, recebendo 39% do total de resíduos coletados, o que resultou em um volume total de 29,7 milhões de toneladas de resíduos com destinação inadequada no ano de referência (ABRELPE, 2022).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), instituído pelo Decreto Federal nº 11.043/2022, representa o principal instrumento da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Ele delinea diretrizes, metas, estratégias e ações destinadas a modernizar a gestão de resíduos sólidos no país, com o objetivo de implementar as disposições da lei. Entre as metas estabelecidas no Planares, destacam-se: i) a eliminação de lixões e aterros controlados até 2024; ii) a recuperação da fração orgânica por meio de sistemas de tratamento biológico; e iii) a recuperação da fração de recicláveis por meio de processos de reciclagem (Brasil, 2022a).

Em Santa Catarina (SC), a quantidade total de RSU gerada é aproximadamente de 1.826.854,86 toneladas por ano, com a coleta de cerca de 1.723.115,36 toneladas por ano. Isso significa que aproximadamente 94% dos resíduos gerados no estado são coletados. Dentre os RSU coletados, 94,14% são recolhidos por meio da coleta convencional, sem separação prévia, enquanto 5,86% são coletados por meio da coleta seletiva de recicláveis. A Figura 4 apresenta a composição gravimétrica dos RSU coletados no estado de SC (Santa Catarina, 2018).

Figura 4 - Composição gravimétrica dos RSU no Estado de SC



Fonte: SANTA CATARINA (2018)

O PERS, realizado em SC, apresenta também a composição gravimétrica por regiões de gestão integrada de resíduos sólidos. O município de Garopaba está inserido na região denominada de São José, a qual apresenta a composição gravimétrica diferente da estadual, com 35,39% para a fração orgânica; 43,63% para os recicláveis; e 20,98% para rejeitos (Santa Catarina, 2018).

Os serviços de coleta de RSU no município de Garopaba são prestados pela iniciativa privada por meio de terceirização, com exceção dos serviços de limpeza

pública (varrição, poda, capina etc.), administrados e prestados diretamente pelo município. A empresa responsável pela coleta, recolhe cerca de 800 toneladas de resíduos todo mês na baixa temporada. Na alta temporada esse número sobe para 1.500 toneladas por mês, devido à atividade turística na região (Garopaba, 2022).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR), Garopaba está em situação de inadimplência no sistema, pois não submeteu a declaração de informações sobre a gestão dos resíduos sólidos urbanos municipais. No que diz respeito ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), os registros apontam que foram coletadas 15.284 toneladas de resíduos no município ao longo do ano de 2022 (SNIS, 2022). Apesar da quantidade significativa de resíduos orgânicos gerados no município, não foram encontradas informações no SNIS referentes à coleta diferenciada de resíduos para destinação à compostagem.

2.3 COMPOSTAGEM

A compostagem é uma solução prática que vai ao encontro da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), sendo definida por esta Lei como uma forma ambientalmente adequada para tratamento dos resíduos orgânicos. Além disso, também contribui significativamente com os objetivos apresentados na Política, como redução na pressão sobre os aterros sanitários e na valorização econômica dos resíduos.

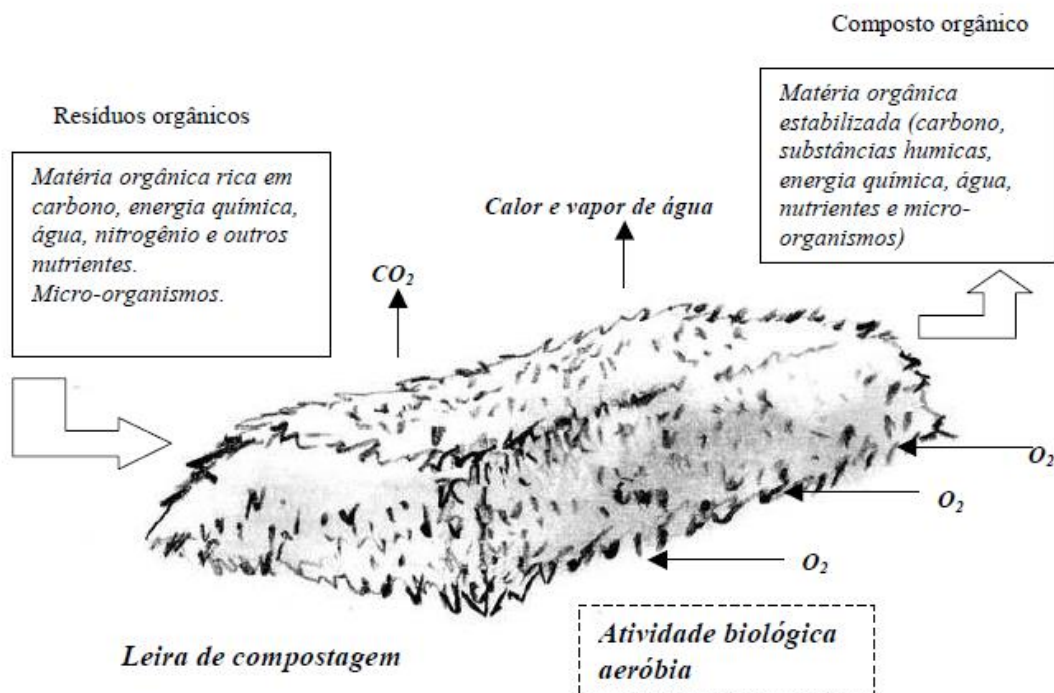
A definição de compostagem pode variar dependendo do enfoque microbiológico, agrônômico ou de engenharia ambiental. Em sua essência, trata-se de um processo de decomposição biológica da matéria orgânica, que ocorre de maneira aeróbica e termofílica, ou seja, depende de oxigênio e gera calor, alcançando temperaturas tipicamente entre 50 °C e 65 °C, podendo atingir picos acima de 70 °C (Inácio; Miller, 2009).

Segundo a Resolução nº 481/2017 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 2017a), compostagem é definida como um "processo de decomposição biológica controlada dos resíduos orgânicos, realizado por uma população diversificada de organismos, em condições aeróbicas e termofílicas, resultando em

material estabilizado, com propriedades e características completamente diferentes daqueles que lhe deram origem".

A técnica de compostagem busca criar condições ideais de umidade, oxigênio e nutrientes, especialmente carbono e nitrogênio, para acelerar a decomposição dos resíduos orgânicos de forma segura, prevenindo a propagação de doenças e eliminando patógenos (Brasil, 2017b). A ação de degradação biológica usa o O_2 disponível para transformar o carbono do substrato orgânico e obter energia, o que libera CO_2 , água e calor, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Processo de compostagem, considerando o método em leiras estáticas com aeração passiva



Fonte: (Inácio; Miller, 2009).

Em condições ideais, uma população diversificada de microrganismos transforma os resíduos orgânicos em um material estabilizado, com propriedades e características completamente diferentes dos materiais que lhe deram origem: o composto orgânico. O composto orgânico, também conhecido como adubo, é constituído de matéria orgânica, substâncias húmicas e elementos minerais. O produto homogêneo de cor marrom-escuro apresenta diversos benefícios para o uso

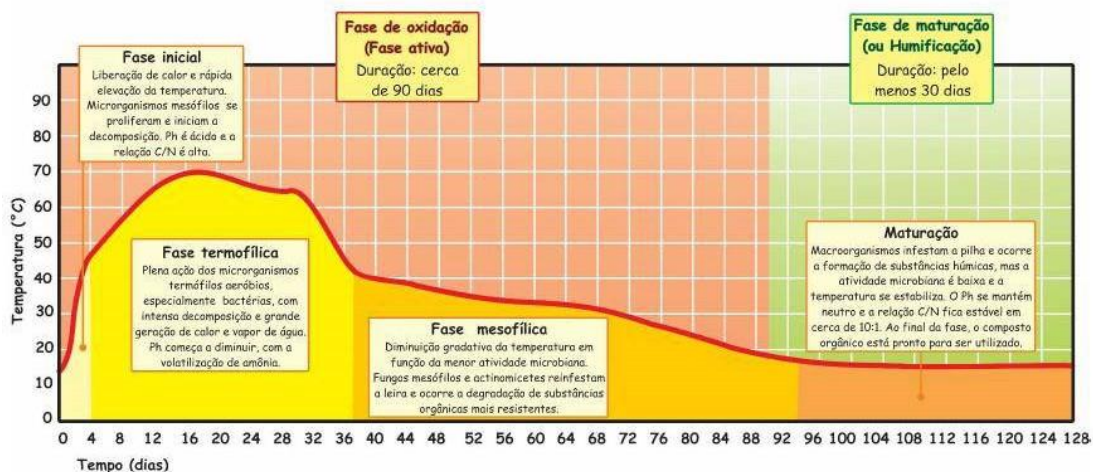
no solo, como fonte de matéria orgânica e nutrientes, formação de agregados mais estáveis e incremento do pH do solo e de fertilizantes minerais (Inácio; Miller, 2009).

Inácio (2010) e Brasil (2017b) delinearam quatro etapas distintas no processo de compostagem:

- Fase Inicial ou de Aquecimento: Este estágio é caracterizado pela expansão das colônias de micro-organismos mesófilos e uma intensificação notável na decomposição da matéria orgânica. Isso resulta na liberação de calor e um aumento rápido da temperatura.
- Fase Termofílica: Durante essa fase, as temperaturas elevam-se consideravelmente, geralmente acima de 45 °C e predominando entre 50 °C e 65 °C. Aqui, os micro-organismos termofílicos desempenham um papel crucial na decomposição do material, gerando calor e vapor d'água. A aeração adequada da pilha de compostagem é essencial nesse estágio, pois o calor produzido impulsiona a circulação do ar.
- Fase Mesofílica: Esta etapa é caracterizada pela degradação de substâncias orgânicas mais resistentes por micro-organismos mesófilos. A atividade microbiana diminui, resultando em uma queda na temperatura e perda de umidade na pilha. Nesse estágio, fungos e actinomicetos desempenham papéis significativos.
- Maturação: Durante esta fase, o composto atinge a maturidade, resultando na formação de substâncias húmicas. A atividade microbiológica diminui consideravelmente, e o composto perde sua capacidade de gerar calor de forma autônoma. A decomposição continua em um ritmo mais lento, especialmente quando o composto orgânico é aplicado ao solo, liberando nutrientes que podem ser absorvidos pelas raízes das plantas (Epstein, 1997).

A Figura 6 ilustra as fases identificadas da compostagem, indicando a temperatura em função do tempo, conforme o Método de Leiras Estáticas com Aeração Passiva (Método UFSC). Neste método, o tempo total de compostagem é aproximadamente de 120 dias, sendo a fase inicial de cerca de 4 dias, a fase termofílica cerca de 30 dias, a fase mesofílica 60 dias e a fase de maturação de pelo menos 30 dias.

Figura 6 - Variação da temperatura na leira em função do tempo de compostagem



Fonte: Brasil (2017b)

Existem diversos métodos de compostagem para o tratamento de resíduos orgânicos, desde tecnologias avançadas até abordagens mais simples. Alguns são projetados para lidar com grandes volumes de resíduos, enquanto outros são mais adequados para tratamento em pequena escala (FAPESC, 2017). Três características principais diferenciam os métodos: frequência de revolvimento da leira, presença ou ausência de aeração forçada e confinamento do material em reatores. Ocorre também, a combinação de diferentes estratégias em diferentes fases (Inácio, 2010).

2.3.1 Métodos de Compostagem

Alguns dos métodos de compostagem incluem as Leiras Revolidas, Leiras Estáticas com Aeração Forçada, Leiras Estáticas com Aeração Passiva (Método UFSC de Compostagem) e os Reatores Biológicos.

O método de compostagem em leiras revolvidas envolve a disposição dos resíduos orgânicos sobre o solo em leiras de dimensões específicas, seguido por reviramentos periódicos até a conclusão do processo. Normalmente realizado em pátios impermeabilizados, esse método utiliza aeração através do revolvimento das leiras, seja de forma manual ou com auxílio de máquinas como retroescavadeiras ou reviradeiras de leira. Devido a essa abordagem, sua capacidade de processamento é limitada a volumes inferiores a 100 toneladas por dia (Luz, 2019).

Amplamente adotado em usinas de triagem e compostagem, esse método é reconhecido por suas leiras em formato piramidal, que são revolvidas regularmente. No entanto, esse processo requer a completa remoção e mistura da estrutura de compostagem, uma vez que sua arquitetura e composição não favorecem a manutenção do oxigênio, resultando rapidamente na redução dos níveis de oxigênio e no início da fermentação (FAPESC, 2017).

Epstein (1997) observa que esse método não é eficiente em termos de aeração, pois os níveis de oxigênio diminuem rapidamente após os reviramentos, exigindo revolvimentos frequentes. No início, os revolvimentos podem ocorrer até uma ou duas vezes por dia, diminuindo para frequência semanal à medida que o processo avança, a fim de evitar situações de anaerobiose e, conseqüentemente, a produção de odores e lixiviados.

Devido à falta de cobertura, esse método enfrenta desafios relacionados ao controle de moscas, à produção elevada de lixiviados e à emissão de odores, sendo mais adequado para climas temperados. Além disso, requer uma distância maior ou uma melhor proteção das áreas verdes para evitar impactos na vizinhança e demanda a constante introdução de água no processo, necessitando de um manejo contínuo (FAPESC, 2017).

Segundo Inácio e Miller (2009), esse método demonstra melhor desempenho na compostagem de grandes volumes de material vegetal, como restos de poda, grama e folhas secas, em comparação com materiais mais pesados e com alto teor de água, como os resíduos orgânicos de comida doméstica.

O método, denominado leiras estáticas com aeração forçada, emprega aeração nas pilhas de resíduos sem reviramento do material, utilizando um sistema de tubulação perfurada para esse fim (Luz, 2019). Nesse processo, equipamentos são utilizados para insuflar ou aspirar ar dentro das leiras. Esse aumento no fluxo de oxigênio permite um controle mais eficaz de odores e acelera o processo de decomposição, resultando em um tempo de compostagem mais curto. Segundo Diaz *et al.* (2007), o sistema de aeração forçada envolve um período inicial de introdução de ar, para dentro e pela leira, sendo que, em período posterior, o ar é forçado para cima, pela leira.

Epstein (1997) argumenta que essa estratégia de aeração demonstrou ser mais eficaz do que os revolvimentos manuais em leiras revolvidas, especialmente durante a fase termofílica, quando o consumo de oxigênio é maior. Isso resulta em um controle

superior da emissão de odores e lixiviado em comparação com outros métodos, além de acelerar significativamente o processo de compostagem. Sendo assim, esse método torna-se adequado para pátios de compostagem localizados em áreas urbanas e periurbanas, desde que atendam aos critérios mínimos para evitar impactos na vizinhança (Inácio; Miller, 2009).

No entanto, essa estrutura apresenta custos mais elevados tanto na implantação quanto na operação, exigindo um manejo cuidadoso das leiras para preservar as estruturas de entrada de ar. Além disso, para garantir o funcionamento eficaz, é necessário o uso de materiais estruturantes, como palha e serragem, para facilitar o fluxo interno de oxigênio. Além disso, esse método requer a introdução de água e acarreta custos adicionais com energia elétrica para a manutenção do sistema de aeração (FAPESC, 2017).

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) desenvolveu uma técnica de compostagem conhecida como leiras estáticas com aeração passiva, ou "método UFSC". Essa técnica se concentra na disposição das leiras de compostagem, e na forma arquitetônica que elas são montadas. As leiras são montadas com paredes retas (ou próximas disso) em relação ao solo, geralmente com o auxílio de resíduos vegetais, como cepilho, serragem, gramíneas, folhas secas e palha, que permitem a formação de paredes autoportantes, conferindo à leira uma forma retangular (Inácio; Miller, 2009). Esses materiais de suporte e a configuração arquitetônica das leiras facilitam o movimento do ar e a entrada de oxigênio, criando um ambiente favorável para o processo de compostagem.

As leiras, por não serem reviradas regularmente, são chamadas de leiras estáticas. Isso ocorre, pois o método não exige revolvimentos ou tombamentos durante sua operação, diferindo de outros métodos de compostagem onde as leiras devem ser revolvidas para mistura dos materiais, homogeneização de temperatura e aeração (Brasil, 2017b).

Este método destaca-se por sua simplicidade e baixo custo de implantação, dispensando estruturas complexas ou equipamentos específicos para facilitar a circulação do ar. Além disso, requer menos espaço em comparação com métodos que envolvem revolvimento constante das leiras, não utiliza energia externa e proporciona um controle satisfatório de odores, além de minimizar a geração de lixiviado. Com pouca exigência de máquinas e equipamentos, torna-se uma opção viável e acessível para diversos projetos de compostagem (Inácio, 2010).

É um método de compostagem que envolve a contenção dos resíduos em estruturas fechadas, como contêineres, grandes cilindros de material metálico, concreto ou alvenaria. Esses métodos dependem inteiramente de mecanismos para aeração forçada e agitação mecânica da massa compostada (Inácio; Miller, 2009). Nos reatores biológicos, é possível reduzir a fase inicial da compostagem, sendo o tempo de retenção do material nos reatores de 7 a 20 dias e o tempo total pode ser reduzido para 70 a 80 dias, tendo período mínimo de maturação do composto de 60 dias (Luz, 2019).

Esse método demanda um investimento significativo na sua implantação. No entanto, oferece a vantagem da automação do processo, permitindo o controle de fatores externos como chuva e clima. É amplamente adotado em países de clima temperado (FAPESC, 2017). Além disso, a estrutura fechada possibilita o controle da qualidade do material produzido. Devido ao alto investimento exigido, esse método é mais adequado para o tratamento de grandes volumes de resíduos orgânicos (Inácio; Miller, 2009).

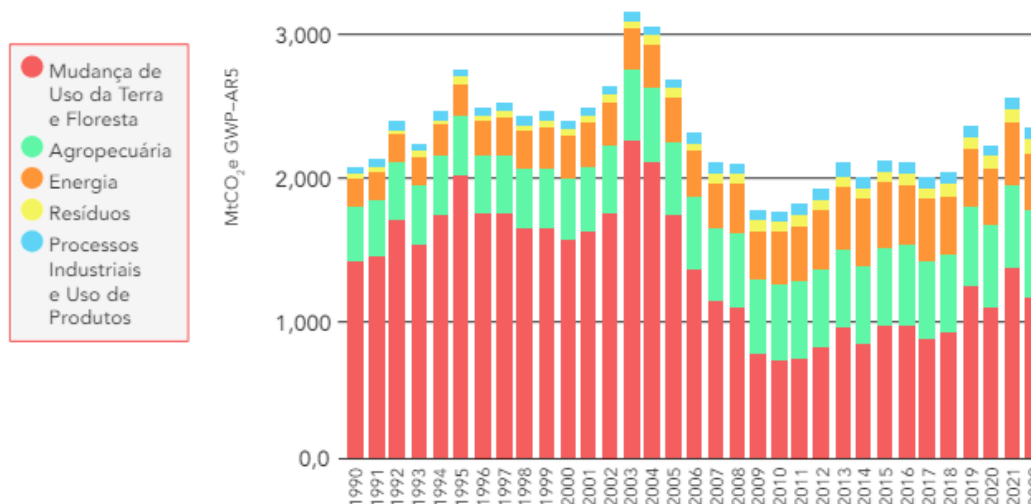
Neste estudo de caso, foi adotado o método UFSC de Compostagem, devido à sua simplicidade e eficiência para o cenário analisado.

2.4 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL

A política ambiental do Brasil, associada às atividades econômicas fortemente baseadas na agropecuária e ao crescente desmatamento, tem resultado em um aumento acelerado das emissões de gases de efeito estufa ao longo do tempo (Ortiz, Guimarães; 2022).

No Brasil, as principais fontes de emissões de GEE contabilizadas estão relacionadas à Mudança de Uso da Terra e Floresta, Agropecuária, Energia, Resíduos e Processos Industriais e Uso de Produtos (SEEG, 2023; IPCC, 2019), conforme categorizadas por setor na Figura 7.

Figura 7 - Emissões de GEE no Brasil, de 1990 a 2021, por setor

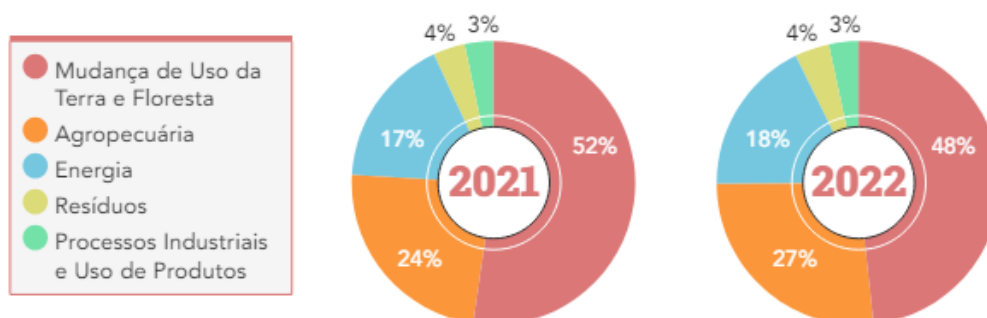


Fonte: SEEG (2023)

Historicamente, o setor de mudança do uso da terra e floresta é a principal fonte de emissões de CO₂e no país. De acordo com Quintão *et al.* (2021), no Brasil, as emissões de gases de efeito estufa, principalmente CO₂, estão diretamente ligadas à importância da vegetação nativa como um reservatório de carbono. Entre 2010 e 2016, por exemplo, as principais mudanças no uso da terra ocorreram pela conversão de florestas, nativas e plantadas, para pastagem; e pela conversão de pastagem para agricultura. Essas conversões promoveram redução de 9% da área de floresta, e um consequente ganho nas áreas de pastagem (aumento de 21%) e agricultura (aumento 58%).

As emissões totais de gases de efeito estufa do Brasil atingiram 2,3 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) em 2022, marcando uma redução de 8% em relação ao ano anterior, quando o país registrou 2,5 bilhões de toneladas de CO₂e. Essa diminuição foi principalmente impulsionada pela queda do desmatamento na Amazônia. No entanto, as mudanças no uso da terra, incluindo o desmatamento em todos os biomas brasileiros, contribuíram com 1,12 bilhão de toneladas brutas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), o que representa 48% do total nacional (SEEG, 2023). A Figura 8 ilustra a participação dos setores no perfil das emissões brasileiras em 2021 e 2022.

Figura 8 - Porcentagem de emissões de GEE brasileiras, por setor, em 2021 e 2022



Fonte: SEEG (2023)

Após as emissões provenientes da Mudança de Uso da Terra e Floresta, a segunda maior parcela está associada à Agropecuária, totalizando 27%. Em 2022, as emissões do setor agropecuário alcançaram o ponto mais alto da série histórica, superando o recorde do ano anterior: 617,2 milhões de toneladas de CO₂e, representando um aumento de 3,2% em relação a 2021 (598,3 milhões de toneladas). Destaca-se também que, há 20 anos, o país ocupa a posição de segundo maior produtor de carne bovina (Ortiz; Guimarães, 2022).

Ao considerar as emissões provenientes do desmatamento, bem como outras alterações no uso da terra, em conjunto com as provenientes do setor agropecuário, torna-se evidente que a atividade agropecuária é responsável por 75% de todas as emissões de GEE no Brasil. De acordo com uma pesquisa recente, entre 90% e 99% do desmatamento tropical é atribuído à atividade agropecuária, mesmo que parte das áreas desmatadas não seja efetivamente utilizada para produção (SEEG, 2023).

O setor de Energia é o 3º maior emissor de GEE no Brasil. Esse setor engloba a exploração e extração de fontes primárias de energia, a conversão dessas fontes primárias em fontes secundárias (como refinarias de petróleo, unidades produtoras de biocombustíveis e centrais de geração de energia elétrica), bem como o consumo final de energia em aplicações móveis (como veículos) e estacionárias (em residências, escritórios e indústrias) (IPCC, 2019). Já as estimativas do setor Processos Industriais e Uso de Produtos (PIUP) levam em conta exclusivamente as emissões ocorridas nas transformações químicas ou físicas de materiais (IPCC, 2019).

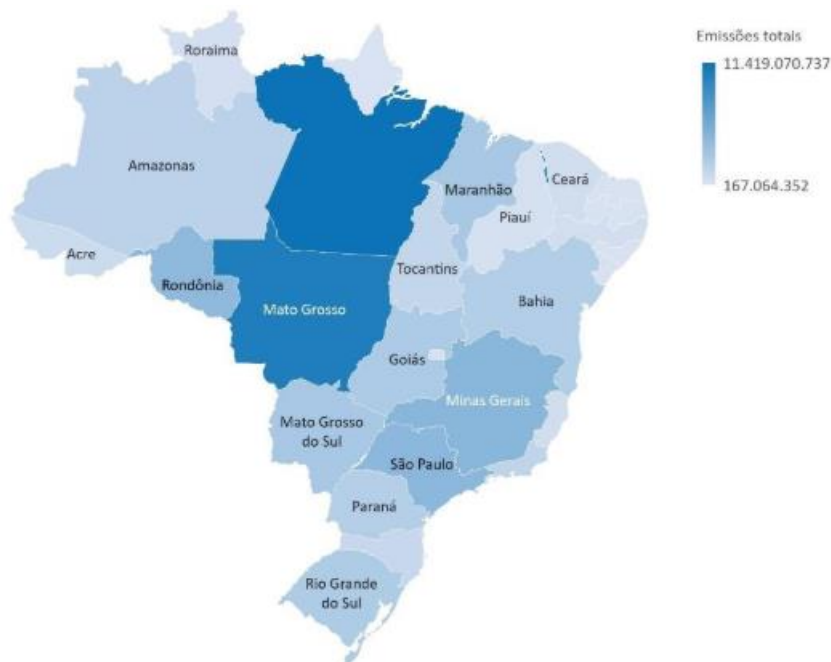
As atividades industriais emitem gases de efeito estufa quando queimam combustíveis para a obtenção de energia. Essas emissões são, então, alocadas no setor de energia. No entanto, essa não é a única forma de emissão nas indústrias, que também geram gases de efeito estufa devido a transformações físico-químicas que ocorrem durante a fabricação de materiais. Em 2022, Energia e PIUP emitiram juntos 490,6 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Esse valor representa 21% das emissões brutas do Brasil em 2022, sendo 18% referentes ao setor de Energia e os outros 3% ao de PIUP. Cerca de 44% das emissões dos setores de energia e PIUP vêm dos transportes (SEEG, 2023).

Com relação à emissão por estado brasileiro, a análise de cluster realizada por Ortiz e Guimarães (2022) revelou que, das emissões totais de 1990 a 2019, há quatro grupos de estados brasileiros com características semelhantes:

- Grupo 1: Pará e Mato Grosso - maiores emissores de CO₂e, com a mudança de uso do solo como principal fonte (85,89% das emissões).
- Grupo 2: Amazonas, Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Paraná, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, Santa Catarina e Tocantins - mudança de uso do solo (42,23%) e agricultura (34,07%) são os maiores emissores.
- Grupo 3: Minas Gerais, São Paulo e Rondônia - emissões distribuídas entre mudança de uso do solo (41,09%), agropecuária (25,10%) e energia (23,04%).
- Grupo 4: Acre, Alagoas, Amapá, Ceará, Distrito Federal, Espírito Santo, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Roraima e Sergipe - menores emissões, com mudança de uso do solo predominando (43,78%).

A distribuição das emissões pode ser visualizada na Figura 9, que mostra os estados com maior volume de emissões em tons mais escuros, destacando que 11 estados foram responsáveis por mais de 80% das emissões totais no período de 1990 a 2019 (Ortiz; Guimarães, 2022).

Figura 9 - Emissões totais de CO₂e de 1990 a 2019 por unidade federativa



Fonte: Ortiz e Guimarães (2022)

De acordo com as Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil, o setor de Resíduos registrou um aumento de 10,0% em suas emissões em 2020, em comparação com 2016. Esse crescimento é atribuído, principalmente, ao aumento das emissões provenientes da disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários (BRASIL, 2022b). Em 2022, o setor de resíduos foi responsável pela emissão de 91,3 milhões de toneladas de CO₂e, uma queda de 1% em relação ao ano anterior. No entanto, as emissões se mostraram estáveis nos últimos três anos, sempre na casa de 91 milhões de toneladas. O setor de Resíduos contribui com 4% das emissões brutas do país, sendo o metano o principal gás emitido, responsável por cerca de 97% das emissões do setor (SEEG, 2023).

2.4.1 Emissões de GEE no setor de resíduos, em compostagem e aterros sanitários

As atividades relacionadas à gestão de resíduos sólidos urbanos, como coleta, transporte, tratamento e disposição, também são responsáveis pela emissão de GEE. A maior parte dessas emissões ocorre durante a fase de disposição em aterros sanitários e lixões. Em comparação, as emissões de GEE de outras etapas, como coleta, transporte e tratamento, são relativamente baixas. Em essência, todas essas

atividades implicam no deslocamento de resíduos do local de geração para outras instalações, o que requer o uso de diversas fontes de energia e combustíveis, e que também resultam em emissões de GEE (Oteng-Ababio *et al.*, 2018).

Os sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos representam uma fonte significativa de emissões de GEE, contribuindo com cerca de 5% das emissões globais, incluindo CO₂, CH₄ e N₂O. Essas emissões diretas de GEE originadas da gestão de RSU são lideradas pelo CH₄, um gás gerado principalmente em aterros sanitários e liberado durante o processo de decomposição da matéria orgânica (Gichamo; Gökçekuş, 2019). Quando os resíduos orgânicos são dispostos em aterros sanitários, passam por um processo de decomposição anaeróbia, ou seja, sem oxigênio, resultando na produção de uma grande quantidade de gás metano devido à ação de bactérias metanogênicas (Veras, 2018). Tais emissões, em aterros sanitários, podem persistir por mais de cinco anos após o descarte dos resíduos (Gichamo; Gökçekuş, 2019).

No Brasil, do total de GEE emitidos no setor de resíduos, a principal contribuição está associada à disposição de resíduos sólidos em aterros controlados, lixões e aterros sanitários (65,5%), seguida do tratamento de efluentes domésticos (27%), do tratamento de efluentes líquidos industriais (6%) e contribuições pouco significativas da incineração, da queima a céu aberto e da compostagem, que são práticas pouco adotadas no Brasil (SEEG, 2023). A Figura 10 ilustra a divisão das emissões do setor.

Figura 10 - Distribuição das emissões do setor de resíduos

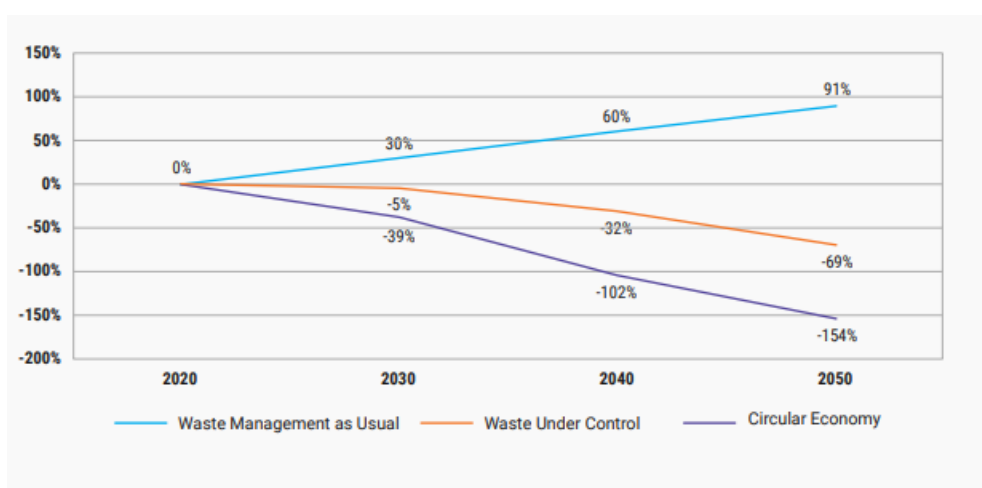


Fonte: SEEG (2023)

Para reduzir as emissões de metano provenientes de aterros sanitários, muitos países têm priorizado o desvio de resíduos biodegradáveis para reciclagem (no caso de papel e papelão), ou compostagem e digestão anaeróbica (no caso de resíduos de jardim e alimentos). Uma melhor gestão de resíduos poderia mitigar 15% a 25% das emissões globais de gases de efeito estufa (UNEP, 2024).

A UNEP (2024) conduziu um estudo utilizando cenários para compreender os possíveis impactos da redução e gestão de resíduos nas emissões de GEE. Modelagens foram realizadas para analisar os efeitos de três cenários distintos, conforme ilustrado na Figura 11, o cenário de Gerenciamento de Resíduos como de Costume (*Waste Management as Usual*), considera a geração de resíduos e as práticas de gestão inalteradas, levando em conta o crescimento previsto na geração de resíduos, especialmente em regiões com capacidade inadequada de gestão; o cenário de Resíduos Sob Controle, é considerado um ponto intermediário, que representa algum avanço na prevenção de resíduos e melhoria na gestão; já o cenário de Economia Circular (*Circular Economy*), considera que a geração de resíduos não está mais ligada ao crescimento econômico, alcançando, também, uma taxa global de reciclagem de resíduos sólidos urbanos de 60%, com o restante dos resíduos sendo gerenciado de forma segura.

Figura 11 - Impacto estimado nas emissões de gases de efeito estufa provenientes de resíduos, com o ano-base de 2020



Fonte: UNEP (2024)

O cenário de Gerenciamento de Resíduos como de Costume apresentou consistentemente um aumento negativo significativo sobre o clima, com as emissões

de GEE projetadas para crescerem 91% até 2050, em comparação com os níveis de 2020. Por outro lado, o cenário de Resíduos Sob Controle reduziria os impactos negativos sobre o clima em 69% até 2050, em relação à linha de base de 2020. Já o cenário de Economia Circular demonstrou um efeito líquido positivo sobre as emissões de GEE, com reduções expressivas de 154% até 2050 (UNEP, 2024). Ao contrário das reduções nas emissões observadas em países desenvolvidos, que migraram de modelos lineares de disposição final de resíduos em aterros sanitários para práticas de economia circular, o Brasil registrou um aumento superior a 100% em suas emissões de GEE oriundas dos resíduos sólidos em 20 anos (Firmo *et al.*, 2019).

De acordo com Nordahl *et al.* (2020), o aterramento é a opção de gerenciamento de RSU mais intensiva em gases de efeito estufa (GEE), emitindo quase 400 kg de CO₂ por tonelada de resíduos orgânicos. As emissões fugitivas de metano são o principal impulsionador na pegada de gases de efeito estufa dos resíduos orgânicos, e qualquer cenário no qual os orgânicos sejam depositados em aterros resultará em emissões de gases de efeito estufa mais elevadas.

A compostagem, por ser um processo aeróbio, gera baixas quantidades de metano por tonelada de resíduo orgânico em comparação com formas de tratamento anaeróbico ou disposição em aterro (Amlinger; Peyr; Cuhls, 2008).

O IPCC considera como valor *default* o fator de emissão padrão para o metano de 4,0 kg CH₄/tonelada de resíduo compostado. Inácio (2010) realizou uma pesquisa para determinar um fator médio de emissão de metano específico para compostagem, e seu estudo estimou que, para cada tonelada de resíduo orgânico, são gerados 1,2 kg de CH₄. Amlinger, Peyr e Cuhls (2008), por sua vez, determinaram valores de fatores de emissão na faixa de 0,243 a 1,517 kg CH₄/tonelada de resíduos. Veras (2018) conduziu leituras de GEE em leiras estáticas com aeração passiva durante 90 dias e não detectou traços de metano durante as medições.

Considerando a metodologia de cálculo AMS.III.F – Emissão evitada de metano por processos biológicos de tratamento, para projetos MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), e o fator de emissão padrão da metodologia de cálculo, de que 1 (uma) tonelada de restos de alimentos gera, em um período de 10 anos de depósito em um aterro sanitário, cerca de 0,85 tCO₂e, considerando emissões de metano. Esta mesma quantidade de resíduo enviada para um processo de

compostagem geraria apenas 0,084 tCO₂e, resultando em um potencial de mitigação das emissões de metano de cerca de 90% (Inácio, 2010).

Em um estudo sobre avaliação do ciclo de vida e alternativas para tratamento e disposição final de resíduos orgânicos, Luiz (2022) concluiu que a disposição de Resíduos Sólidos Urbanos em aterros sanitários ocasiona maiores emissões de GEE quando comparada com qualquer alternativa tecnológica. Segundo o estudo, a compostagem apresenta resultados positivos na redução de emissões de GEE, principalmente quando comparada ao aterro sanitário, embora se restrinja ao tratamento da matéria orgânica presente nos RSU. Ambas as alternativas se aplicam apenas ao beneficiamento da fração orgânica e devem ser priorizadas para a finalidade de redução de GEE, já que quando essa fração é encaminhada para aterros sanitários, ocorre a decomposição anaeróbia, emitindo altos índices de gás metano, um dos principais GEE.

2.5 INFLUÊNCIA DOS GEE NO AQUECIMENTO GLOBAL

Desde meados do século XVIII, com o advento da Revolução Industrial, a emissão de GEE, especialmente o dióxido de carbono de origem humana tem crescido de forma significativa. A economia global, amplamente baseada na queima de combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral para o fornecimento de energia, tem contribuído para a produção anual de um excesso estimado em cerca de 3,8 bilhões de toneladas de CO₂. Como resultado desse acúmulo anual de CO₂, sua concentração na atmosfera tem aumentado continuamente (Lacerda; Nobre, 2010) o que intensifica o efeito estufa natural e aquece o planeta (Anderson; Hawkins; Jones, 2016).

Conforme o relatório do IPCC (2023), os aumentos nas concentrações de GEE desde cerca de 1750 são inequivocamente atribuídos às emissões de GEE provenientes de atividades humanas durante esse período. As emissões líquidas acumuladas históricas de CO₂ entre 1850 e 2019 totalizaram 2.400 ± 240 GtCO₂, com mais da metade (58%) ocorrendo entre 1850 e 1989 e aproximadamente 42% ocorrendo entre 1990 e 2019. Em 2019, as concentrações atmosféricas de CO₂ atingiram 410 partes por milhão, o valor mais alto registrado em pelo menos 2 milhões de anos, enquanto as concentrações de metano (1.866 partes por bilhão) e óxido

nitroso (332 partes por bilhão) alcançaram níveis sem precedentes em pelo menos 800.000 anos.

O excesso de gases de efeito estufa na atmosfera, em comparação com os níveis naturalmente presentes, emerge como a principal causa do aquecimento global, ao introduzir moléculas carbonadas adicionais no ambiente (Gichamo; Gökçekuş, 2019). Isso se deve ao fato de que esses GEEs, particularmente o dióxido de carbono, absorvem parte da radiação na atmosfera. Essa absorção de radiação conduz ao aumento da temperatura da Terra, resultando no aquecimento das águas superficiais e no aumento da umidade do ar. Essas mudanças, por sua vez, afetam a circulação atmosférica, influenciando a pressão atmosférica e os padrões de vento (Luiz, 2022).

Prevê-se que o aquecimento global e as consequentes mudanças climáticas causem um aumento nas temperaturas médias e no nível do mar, resultando em maior frequência e intensidade de secas, inundações, ondas de calor e pressão crescente sobre a disponibilidade de água (Gichamo; Gökçekuş, 2019). De acordo com o IPCC (2023), os riscos associados também aumentam com cada incremento no aquecimento. Na América do Sul, por exemplo, o aumento da temperatura global está ligado a diversos riscos, incluindo:

- Risco à segurança hídrica;
- Impactos significativos na saúde devido ao aumento das epidemias, especialmente doenças transmitidas por vetores;
- Degradação dos ecossistemas de recifes de corais devido ao branqueamento;
- Risco à segurança alimentar devido a secas mais frequentes e intensas;
- Danos à vida e infraestrutura causados por inundações, deslizamentos de terra, aumento do nível do mar, tempestades e erosão costeira.

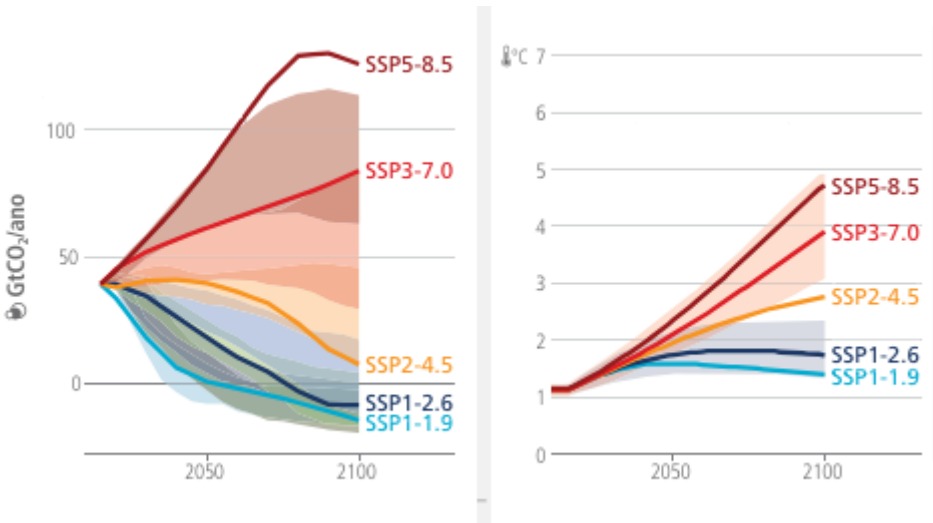
O sistema climático é complexo, envolvendo uma série de processos interligados. Estes incluem alterações na circulação atmosférica e oceânica, que redistribuem calor ao redor do globo, o derretimento de neve e gelo, que modifica o albedo da Terra, afetando a quantidade de radiação solar refletida, a absorção de CO₂ pelas plantas, mudanças na quantidade e tipos de nuvens, e variações no vapor d'água atmosférico, que é mais retido em uma atmosfera mais quente (Anderson;

Hawkins; Jones, 2016). Paralelamente ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, observam-se alterações rápidas e generalizadas na atmosfera, nos oceanos, na criosfera e na biosfera. A influência humana na mudança climática já está causando efeitos notáveis em diversos extremos climáticos e eventos meteorológicos em todas as regiões do mundo, resultando em impactos adversos generalizados e em perdas relacionadas tanto à natureza quanto às comunidades humanas (IPCC, 2023).

Com o intuito de entender a relação entre as emissões de CO₂ e o aquecimento global em termos de temperatura, e de oferecer respostas quantitativas sobre a necessidade de controlar essas emissões para conter o aumento da temperatura global, são realizadas projeções por meio de Modelos de Sistema Terrestre (*Earth System Models* - ESMs). Esses modelos, dada sua complexidade, operam em supercomputadores e abarcam os diversos processos que ocorrem na atmosfera, na terra e nos oceanos (Anderson; Hawkins; Jones, 2016).

O IPCC (2023) utiliza cinco Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSP1 a SSP5), nas quais cenários e trajetórias modeladas são empregados para investigar emissões futuras, mudanças climáticas, impactos e riscos correlatos, bem como possíveis estratégias de mitigação e adaptação, embasados em uma série de premissas. As SSPs foram concebidas para abranger uma variedade de desafios relacionados à mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Para avaliar os impactos climáticos, o risco e a adaptação, as SSPs são empregadas para examinar a exposição, a vulnerabilidade e os desafios futuros da adaptação. Dependendo dos níveis de mitigação de GEE, os cenários de emissões modeladas com base nas SSPs podem ser coerentes com níveis baixos ou altos de aquecimento. A Figura 12 ilustra graficamente as emissões de dióxido de carbono em gigatoneladas por ano, bem como o aumento da temperatura média global em °C, conforme previsto por cada modelo.

Figura 12 - Emissões de CO₂ e temperatura para cenários baseados em SSP ao longo do século XXI



Fonte: IPCC (2023)

Cada um dos cenários das SSPs está associado a diferentes níveis de emissões, variando de muito baixos a muito altos, e essas emissões estão diretamente ligadas aos limites de aquecimento estipulados para cada categoria. O alcance de aquecimento estudado abrange desde um aumento de 1,5°C até valores superiores a 4°C, como ilustrado na Figura 13 abaixo.

Figura 13 - Categorias, limites de aquecimento e cenários de emissões

Categoria no WGIII	Descrição da categoria	Cenários de emissões de GEE (SSPx-y*) no WGI e WGII
C1	limitar o aquecimento a 1,5°C (>50%), sem ultrapassagem da temperatura programada ou com ultrapassagem limitada	Muito baixa (SSP1-1.9)
C2	retornar o aquecimento a 1,5°C (>50%) após uma alta ultrapassagem	
C3	limitar o aquecimento a 2°C (>67%)	Baixa (SSP1-2.6)
C4	limitar o aquecimento a 2°C (>50%)	
C5	limitar o aquecimento a 2,5°C (>50%)	
C6	limitar o aquecimento a 3°C (>50%)	Intermediária (SSP2-4.5)
C7	limitar o aquecimento a 4°C (>50%)	Alta (SSP3-7.0)
C8	exceder o aquecimento de 4°C (>50%)	Muito alta (SSP5-8.5)

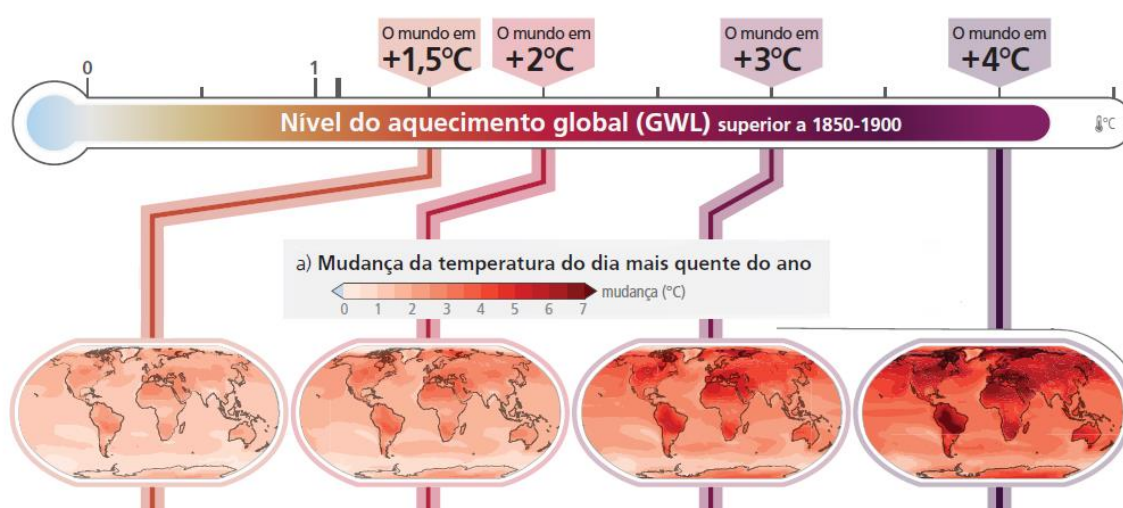
Fonte: IPCC (2023)

O aumento da temperatura global para 1,5°C e 2°C acarreta riscos significativos para sistemas naturais e humanos, incluindo ameaças à saúde, segurança alimentar

e biodiversidade. A 1,5°C, espera-se que espécies enfrentem alto risco de extinção, enquanto os recifes de corais podem diminuir em até 90%. Com o aquecimento para 2°C, os riscos aumentam drasticamente, afetando a disponibilidade de alimentos, a qualidade da dieta e aumentando os eventos climáticos extremos. A 3°C de aquecimento, os impactos se tornam mais generalizados e irreversíveis, com riscos sistêmicos e mudanças abruptas. Além disso, um aquecimento de 4°C ou mais pode levar a extensas perdas na biodiversidade, escassez de água e aumento de incêndios florestais, afetando bilhões de pessoas em todo o mundo (IPCC, 2023).

A Figura 14 traz como exemplo o impacto dos diferentes níveis de aquecimento global, em comparação a 1850-1900, na mudança da temperatura sentida.

Figura 14 - Mudança da temperatura nos diferentes níveis do aquecimento global



Fonte: IPCC (2023)

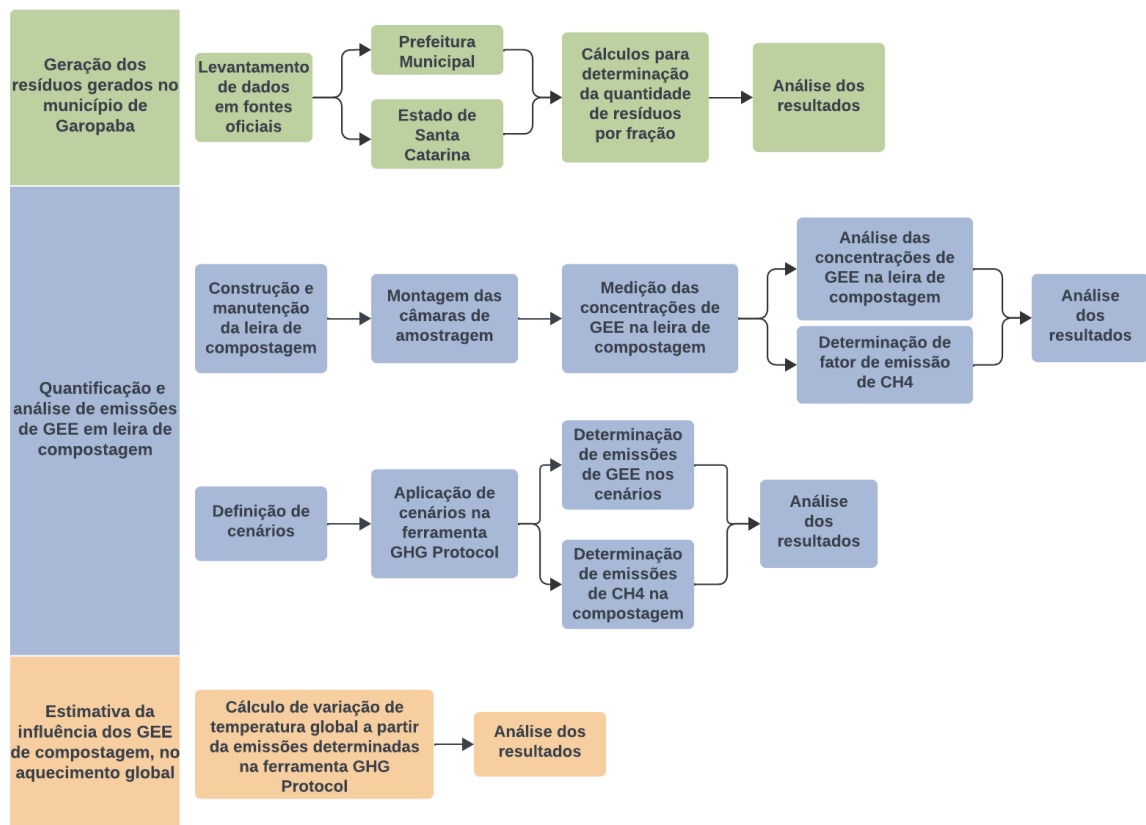
A projeção indica que a temperatura do dia mais quente do ano aumentará de forma mais acentuada (1,5-2 vezes o GWL) em algumas regiões de latitude média e semiáridas, assim como na área da monção sul-americana. A urbanização exacerbou ainda mais esses extremos de calor. Entre 2011-2020, a temperatura média foi cerca de 1,1°C mais alta do que entre 1850-1900, e a última vez que a temperatura da superfície global atingiu 2,5°C ou mais foi há mais de 3 milhões de anos (IPCC, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo divide-se em três etapas: geração dos resíduos gerados no município de Garopaba; quantificação e análise das emissões de gases de efeito estufa em leira de compostagem; e estimativa da influência dos gases de efeito estufa, provenientes de compostagem, no aquecimento global.

Para atingir os objetivos deste trabalho, foram seguidas as etapas detalhadas no fluxograma da Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma das etapas realizadas



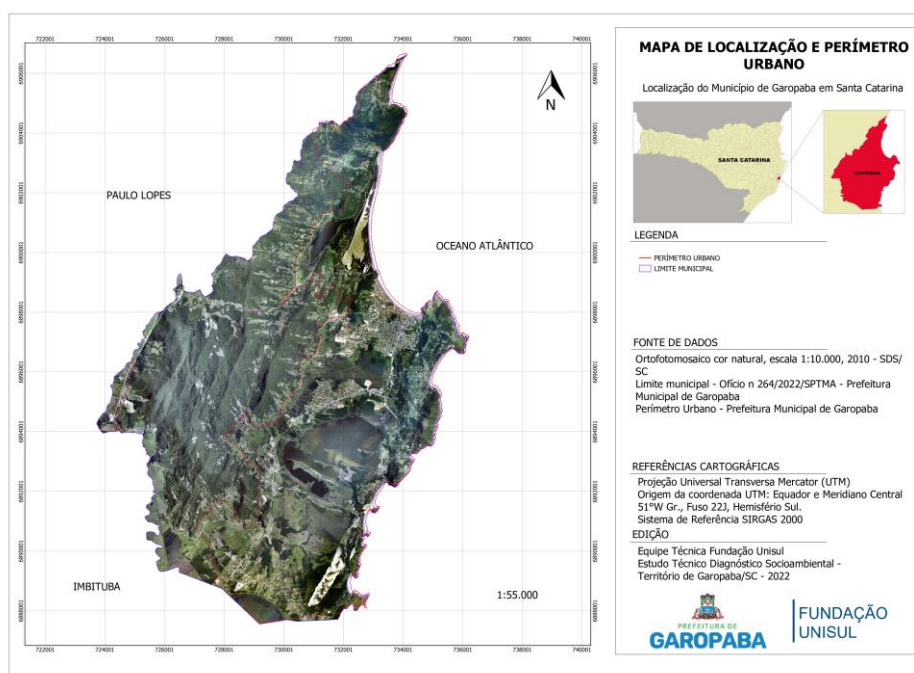
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As etapas apresentadas no fluxograma são detalhadas nos subitens a seguir. Os materiais utilizados no estudo estão descritos no subitem 3.2, enquanto os métodos adotados são abordados no subitem 3.3, 3.4 e 3.5.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado no Município de Garopaba (Figura 16), localizado no litoral sul de Santa Catarina, com latitude Sul de 28°1'25", longitude Oeste de 48°36'50" e altitude de 17 metros em relação ao nível do mar. Faz divisa ao sul com o Município de Imbituba, ao norte e oeste com o Município de Paulo Lopes e a Leste com o Oceano Atlântico. Com uma área territorial de 114.773 quilômetros quadrados, Garopaba tem uma população 29.959 habitantes e densidade demográfica de 261,03 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2022). O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) é de 0,753 considerado elevado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD).

Figura 16 - Mapa de Localização e Perímetro Urbano de Garopaba.



Fonte: GAROPABA, 2022.

O município de Garopaba situa-se na zona costeira subtropical sul, apresentando um clima influenciado principalmente por massas de ar de alta pressão de origem tropical marítima e polar marítima. O centro de ação da massa Tropical Atlântica (mTa - quente e úmida), conhecida por anticiclone semi-fixo do Atlântico Sul, é caracterizado pela presença dos ventos do quadrante norte, predominando os ventos NE durante todo o ano. Já o centro de ação das massas polares móveis (mPa

- fria e úmida), é identificado pela entrada de frentes frias com ventos intensos. De acordo com a classificação de clima de KÖPPEN, o município de Garopaba apresenta a variação de clima Cfa, conforme descrita por Pandolfo *et al.* (2002). O Cfa – Clima subtropical (temperado úmido com verão quente) – é caracterizado com temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida.

3.2 MATERIAIS

Nesta seção, são descritos os recursos utilizados no estudo, incluindo os materiais necessários para a construção da leira de compostagem e das câmaras de amostragem, o equipamento para medição da concentração de GEE, a infraestrutura empregada e o software utilizado.

3.2.1 Materiais utilizados para o experimento de compostagem

A leira de compostagem foi montada no Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Garopaba, em uma área externa descoberta. O método UFSC de compostagem foi adotado como referência, conforme ilustrado na Figura 17. Para a montagem, foram utilizados os seguintes materiais: galhos, palhada, serragem, resíduos orgânicos e inoculante.

Os resíduos orgânicos, provenientes de restaurantes locais, consistiam em restos de comida cozida, cascas de frutas, além de restos de legumes e verduras. Já o inoculante utilizado foi composto por material orgânico em fase final de maturação, oriundo de um processo anterior de compostagem. Esse material é empregado como fonte adicional de microrganismos, e auxilia na colonização uniforme da pilha e o sucesso das fases iniciais do processo de compostagem (Teodoro, 2016).

Figura 17 - Montagem da leira de compostagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para medir as concentrações de GEE, foram construídas e instaladas três câmaras de amostragem durante a montagem da leira de compostagem. A construção das câmaras, ilustrada na Figura 18, envolveu os seguintes materiais:

- 4,5 metros de cano de água 50mm (1,5m cada para cada câmara)
- Válvulas de 50mm;
- 3 Reduções de 50mm para 25mm;
- 0,9m de Cano de água 25mm (30 cm para cada câmara);
- 3 Cap 25 mm;
- Lixa d'água P 320;
- Cola de cano;
- Broca 8 para madeira;
- Furadeira.

Figura 18 - Câmara de amostragem para medição de GEE



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.2.2 Equipamento utilizado para a medição das concentrações de GEE

Para quantificar as concentrações de gases de efeito estufa na leira de compostagem, utilizou-se um analisador portátil de gases Optima 7, ilustrado na Figura 19. Este analisador extrai uma amostra dos gases através de uma sonda, utilizando uma bomba de gás embutida que puxa os gases a serem amostrados. A amostra é limpa e seca em um separador de condensado que incorpora um filtro de partículas e analisa os gases por sensores embutidos no aparelho. O Optima 7 utiliza sensores específicos para diferentes tipos de gases, que podem incluir tecnologias como infravermelho, eletroquímica, catalítica ou fotoionização, dependendo do tipo de gás que está sendo monitorado. Para medir a concentração de CO_2 (dióxido de carbono) e CH_4 (metano), gases monitorados neste estudo, o Optima 7 utiliza sensores baseados na tecnologia de infravermelho. Esta tecnologia é adequada para esses dois tipos de gases, pois ambos têm fortes bandas de absorção no espectro infravermelho. Sensores de infravermelho detectam a quantidade de luz absorvida por CO_2 e CH_4 em comprimentos de onda específicos, permitindo a quantificação precisa de suas concentrações. Os sensores detectam a presença de gases e medem suas concentrações; por exemplo, sensores de infravermelho absorvem a luz em

comprimentos de onda específicos que correspondem ao gás alvo, e a quantidade de luz absorvida é proporcional à concentração do gás. Os sinais dos sensores são processados pelo dispositivo para calcular a concentração de gases, utilizando algoritmos internos que ajudam a interpretar os dados dos sensores. Os resultados são exibidos em tempo real em uma tela digital, permitindo aos operadores monitorarem continuamente os níveis de gases.

Figura 19 – Analisador Portátil Optima 7



Fonte: Confor (2022).

O analisador portátil Optima 7 utilizado no presente estudo baseia-se na tecnologia de medição por infravermelho para a análise dos gases CO₂ e CH₄, conforme apresentado na Tabela 2. De acordo com o manual do equipamento, a faixa nominal de medição para CO₂ é de 0 a 0,40 Vol% e para CH₄ é de 100 a 40.000 ppm. A precisão do equipamento é de $\pm 0,3$ Vol% ou 3% para CO₂ e ± 400 ppm ou 5% para CH₄, com tempos de resposta inferiores a 35 segundos. Essas características asseguram a confiabilidade e a eficiência na coleta de dados durante o monitoramento das concentrações destes gases.

Tabela 2 - Especificações técnicas do analisador portátil Optima 7 utilizado para medições de gases.

Parâmetro	CO₂	CH₄
Faixa Nominal de Medição	0 – 0,40 Vol%	100 – 40.000 ppm
Resolução	0,01 Vol%	10 ppm
Precisão (Erro)	±0,3 Vol% ou 3%	±400 ppm ou 5%
Tempo de Resposta (T90)	< 35 s	< 35 s

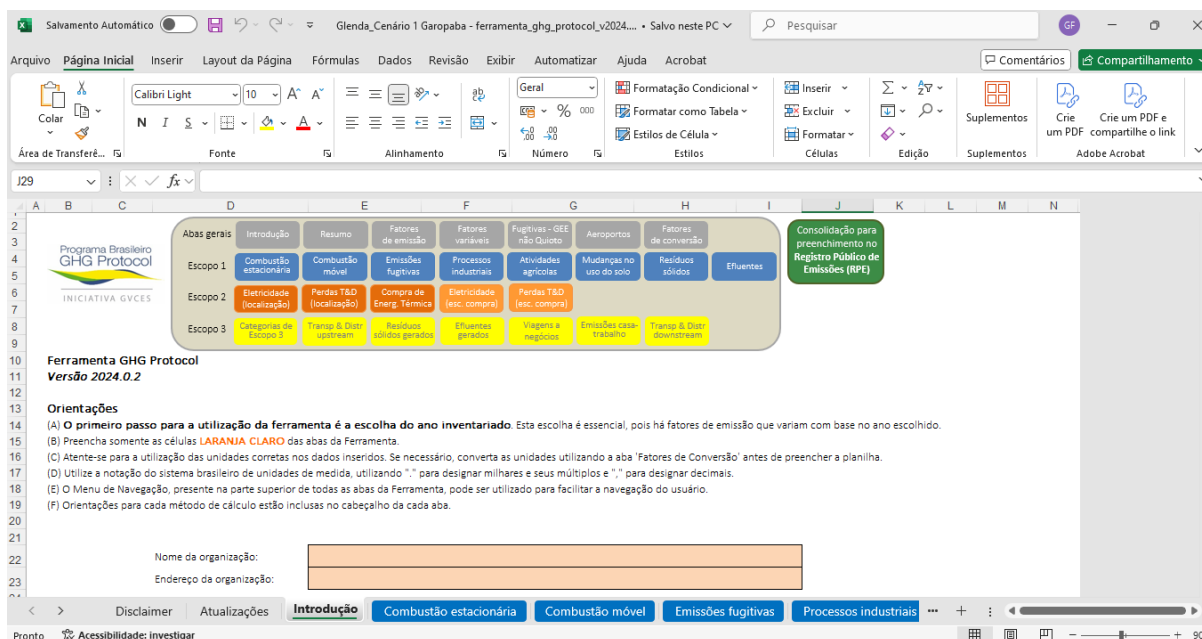
Fonte: Adaptado de Confor (2022)

3.2.3 Software utilizado

Para calcular e estimar as emissões relacionadas aos resíduos orgânicos destinados ao aterro sanitário e/ou compostagem, foi utilizada a ferramenta de cálculo do Programa Brasileiro GHG Protocol, versão 2024. Esta ferramenta é compatível com a norma ISO 14.064 e com as metodologias de cálculo do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

A ferramenta foi desenvolvida no ambiente do Microsoft Excel, um software amplamente utilizado para modelagem e análise de dados, conforme mostra a Figura 20. Seu funcionamento baseia-se no uso de dados de atividade e fatores de emissão. Os fatores de emissão permitem estimar as emissões de GEE a partir de variáveis disponíveis, como toneladas de combustível consumido ou toneladas de resíduos gerados.

Figura 20 – Ferramenta de cálculo de emissões do Programa Brasileiro GHG Protocol



Fonte: FGV (2024).

Além disso, a ferramenta é gratuita e pode ser obtida mediante o preenchimento de um formulário para acesso à versão mais recente. Está disponível para download no site do Programa Brasileiro GHG Protocol, hospedado no Centro de Estudos em Sustentabilidade (FGVces) da Fundação Getúlio Vargas.

Essa ferramenta oferece estimativas detalhadas das emissões absolutas, alinhando-se aos padrões globais de mensuração e relato de GEE. Sua utilização facilita a análise comparativa com outros estudos e cenários.

3.3 MÉTODOS

Nesta seção, apresentam-se os métodos empregados neste estudo, abrangendo as etapas de levantamento da geração de resíduos sólidos no Município de Garopaba, a quantificação das emissões de gases de efeito estufa e a análise da influência desses gases, originados pela compostagem, no aquecimento global.

3.3.1 Levantamento da geração de resíduos sólidos no município de Garopaba

Para identificar a geração dos resíduos sólidos gerados em Garopaba, este estudo fundamentou-se na análise de dados provenientes de fontes oficiais, incluindo o Plano Municipal de Saneamento Básico da Prefeitura Municipal de Garopaba (PMSG), o Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina (PERS/SC) e o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

Esta etapa compreendeu a coleta de informações sobre a origem, volume e características dos resíduos sólidos urbanos, bem como os métodos de destinação e disposição final adotados no município de Garopaba. O objetivo principal foi analisar a composição gravimétrica e as quantidades de resíduos coletados, oferecendo uma compreensão abrangente, especialmente da geração de resíduos orgânicos.

A determinação da quantidade de resíduos sólidos, em cada fração, exige a consideração de duas variáveis essenciais:

- a) Quantidade coletada ao longo de um período de tempo (dia, mês ou ano): Idealmente, este dado deve ser uma média anual para evitar influências sazonais.
- b) Caracterização gravimétrica dos resíduos do município: Essa análise deve incluir, no mínimo, a diferenciação entre recicláveis secos, rejeitos e orgânicos compostáveis.

Para estimar a quantidade de resíduos orgânicos gerados em Garopaba, foram utilizados dados sobre a quantidade total de resíduos coletados anualmente (de 2017 a 2021), obtidos do documento "Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico: Produto II – Relatório do Diagnóstico Técnico-Participativo" da Prefeitura Municipal de Garopaba. As informações sobre a quantidade de resíduos coletados disponível nesse documento foram fornecidas pela empresa responsável pelo serviço de coleta de resíduos no município (Garopaba, 2023). Para o ano de 2022, utilizou-se dados do SNIS.

O PERS/SC fornece a caracterização gravimétrica dos resíduos gerados em Santa Catarina, agrupados por região de gestão integrada de resíduos sólidos. Este levantamento utiliza dados gravimétricos coletados diretamente dos municípios, por

meio de questionários ou informações presentes nos planos de resíduos sólidos municipais e/ou intermunicipais (Santa Catarina, 2018).

Com base nestes dados, foi possível calcular a geração de cada categoria de resíduos do município. Para isso, utilizou-se a equação 1:

$$Q_{fração} = P_{fração} \times Q_{total} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$Q_{fração}$ = quantidade de resíduos gerados de determinada fração (orgânica, reciclável ou rejeito) em um dado período (t/ano);

$P_{fração}$ = parcela de determinada fração em relação ao total de resíduos da coleta (adimensional);

Q_{total} = quantidade total de resíduos gerados em determinado período (t/ano).

A quantidade de resíduos por fração, especialmente a fração orgânica calculada, foi utilizada como base para a análise dos cenários propostos na etapa de quantificação das emissões de GEE através da ferramenta GHG Protocol.

3.3.2 Quantificação das emissões de gases de efeito estufa

A quantificação das emissões de GEE foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, foram feitas medições in loco, que incluíram a construção de uma leira de compostagem, a montagem e instalação de câmaras de amostragem e a medição das concentrações de CO₂ e CH₄ na leira. A segunda etapa consistiu na proposição de cenários com diferentes quantidades de resíduos orgânicos destinados à compostagem e ao aterro sanitário. Com base nesses cenários, utilizou-se a ferramenta de cálculo de emissões do GHG Protocol para quantificar as emissões.

3.3.2.1 Quantificação e análise da concentração de GEE em leira de compostagem

As medições de GEE foram realizadas em uma leira estática com aeração passiva, conhecida como "Método UFSC de Compostagem". Este método se destaca por não exigir revolvimentos frequentes ou aeração forçada, utilizando materiais com alta relação Carbono/Nitrogênio, como aparas de madeira, palha e serragem, para manter a porosidade da mistura (Inácio; Miller, 2009). Embora não necessite de revolvimentos frequentes, a leira utilizada neste estudo foi revolvida superficialmente para homogeneização e aeração da massa compostada, como ilustrado na Figura 16.

Figura 21 - Revolvimento superficial durante a fase termofílica



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A escolha do Método UFSC de Compostagem foi motivada pelo seu custo acessível e pela sua capacidade de atender a diversas necessidades. A leira de compostagem foi montada com dimensões de 4 metros de comprimento, 1 metro de altura e 1 metro de largura, seguindo os passos ilustrados na Figura 17.

Figura 22- Passo a passo da montagem da leira de compostagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A montagem da leira foi realizada em 28 de setembro de 2023. Utilizou-se galhos para a base, serragem e inoculante para a mistura com resíduos orgânicos, e palhada como material estruturante. A proporção de matéria seca utilizada foi 2/3 do volume de resíduos orgânicos, tanto na montagem, quanto nos abastecimentos.

Após a montagem inicial, a leira foi abastecida com novas quantidades de resíduos orgânicos em quatro ocasiões, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de resíduos orgânicos compostados na montagem da leira e por abastecimento

Atividade	Data	Quantidade de resíduos orgânicos (kg)
Montagem da Leira	28-set-23	231,00
Abastecimento 1	10-out-23	215,00
Abastecimento 2	19-out-23	223,00
Abastecimento 3	7-nov-23	197,00
Abastecimento 4	27-nov-23	138,00
Total de resíduos orgânicos compostados (kg)		1.004,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A cada abastecimento, a camada superior de palhada na leira de compostagem foi deslocada para os lados, criando uma parede lateral. Em seguida, realizaram-se

revolvimentos manuais para promover a aeração da pilha antes de adicionar novas porções de resíduos orgânicos e serragem. Após esse procedimento, a leira foi coberta com uma nova camada de palhada. Nas semanas subsequentes ao período de abastecimento, realizaram-se apenas revolvimentos superficiais para manter a aeração da leira, bem como o monitoramento e medição das concentrações de GEE.

O estudo prático totalizou 28 semanas, desde a montagem da leira até o término do monitoramento das concentrações. Considerando que o último abastecimento da leira ocorreu em 27/11/2023, o período total de compostagem dos resíduos orgânicos foi de 20 semanas, englobando as fases termofílica, mesofílica e de maturação do composto. Em 12/04/2024, após 197 dias desde o início do experimento e 138 dias de compostagem, o composto orgânico foi considerado maturado e pronto para uso, principalmente devido ao tempo de mais de 120 dias de compostagem, tempo necessário para garantir a sua estabilidade e qualidade. Além disso, o composto atendeu a outras características importantes: apresentou coloração escura, textura solta, odor semelhante ao de terra e ausência de resíduos de alimentos visíveis, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23- Composto orgânico da leira de compostagem de estudo em 12/04/2024



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para quantificar as concentrações de gases de efeito estufa na leira de compostagem, utilizou-se um analisador portátil de gases Optima 7. Com o analisador portátil, foram realizadas medições de CO_2 e CH_4 . O monitoramento dos gases

ocorreu entre 29/09/2023 e 12/04/2024 ao longo de 28 semanas, totalizando 38 amostragens. Durante as amostragens realizadas, o analisador Optima 7 permaneceu ligado durante a operação, que em cada medição durou entre 5 e 10 minutos. A Figura 24 ilustra as câmaras de amostragem para medição dos GEE inseridas na leira de compostagem do estudo, e a Figura 25 a medição sendo realizada.

Figura 24 - Câmara de amostragem para medição de GEE inseridas na leira de compostagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 25 - Medição de GEE na leira de compostagem utilizando o analisador portátil Optima 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Nos 38 dias de amostragem, foram obtidos 114 dados das concentrações de CH_4 nas amostras de emissões, sendo estes os dados utilizados para determinar a emissão do metano em toneladas. A ferramenta de medição registrou não somente as concentrações de metano, mas também os valores de pressão atmosférica, temperatura do ar, concentração de CO_2 , entre outros.

Ao longo de 28 semanas, foram realizados registros periódicos e o primeiro passo para determinar os níveis de emissão em cada medição foi converter os valores de concentração de CH_4 medidos de partes por milhão (ppm) para microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Para isso, utilizou-se a equação dos gases (Equação 2), que determina a relação existente entre estas duas grandezas, juntamente com a Equação 3, que demonstra a relação entre a equação dos gases e a concentração.

$$P \times V = \frac{m \times R \times T}{M} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

P = pressão (Pa);

V = volume (m³);

m = massa do gás (g);

R = constante universal dos gases (Pa.m³/K.mol);

T = temperatura do gás (K);

M = massa molar (g/mol).

$$C = \frac{P \times M}{R \times T} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

C = concentração da solução (mol/m³);

P = pressão (Pa);

M = massa molar (g/mol);

R = constante universal dos gases (Pa.m³/K.mol);

T = temperatura (K);

O processo de transformação da concentração de gás carbônico e metano foi representado nas Equações 4 e 5, respectivamente, utilizando os valores de pressão em pascal, temperatura, que foi convertida de graus Celsius para Kelvin, e concentração de gás medidos pela ferramenta, além dos valores de massa molar de 44 g/mol do CO₂ e 16 g/mol para o CH₄, e 8,314 Pa.m³/K.mol para a constante universal dos gases.

$$C_{CO_2} = \left(\frac{(P_t \times M_{CO_2})}{(R \times (T_a + 273))} \right) \times C_{ppm_{CO_2}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

C_{CO_2} = concentração do CO₂ (µg/m³);

P_t = pressão atmosférica (Pa);

M_{CO_2} = massa molar do CO₂ (g/mol);

R = constante universal dos gases (Pa.m³/K.mol);

T_a = temperatura do ar (°C);

$C_{ppm_{CO_2}}$ = concentração em partes por milhão de CO₂ (ppm).

$$C_{CH_4} = \left(\frac{(P_t \times M_{CH_4})}{(R \times (T_a + 273))} \right) \times C_{ppm_{CH_4}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

C_{CH_4} = concentração do CH₄ (µg/m³)

P_t = pressão atmosférica (Pa);

M_{CH_4} = massa molar do CH₄ (g/mol);

R = constante universal dos gases (Pa.m³/K.mol);

T_a = temperatura do ar (°C);

$C_{ppm_{CH_4}}$ = concentração em partes por milhão de CH₄ (ppm).

Na segunda etapa, foi realizada a conversão das concentrações de µg/m³ para t/m³ de CO₂ e CH₄, bem como a quantidade em tonelada (t) de CH₄ emitido, através das Equações 6, 7 e 8, respectivamente, utilizando-se 0,0007 t/m³ como valor de densidade do metano.

(Equação 6)

$$CF = \frac{C}{10^{12}}$$

Onde:

CF = Concentração final (t/m³);

C = concentração de gás (µg/m³);

$$t = \frac{C}{d} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

t = título da solução em massa (t);

C = Concentração da solução (t/m³);

d = densidade do gás (t/m³);

$$t_{CH_4} = \frac{C_{CH_4}}{10^{12} \times d_{CH_4}} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

t_{CH_4} = emissão de CH₄ (t);

C_{CH_4} = concentração de CH₄ (µg/m³);

d_{CH_4} = densidade do CH₄ (t/m³).

Após obtenção dos dados de emissões de CH₄ em toneladas, tais dados foram aplicados à metodologia MDL (CDM - *Clean Development Mechanism*, em inglês) AMS-III.F - *Avoidance of methane emissions through composting – Version 12.0*, para cálculo das emissões de gases de efeito estufa na compostagem, bem como determinação do-fator de emissão do metano.

Este trabalho limitou-se a calcular apenas as emissões de CH₄ referentes à compostagem, não considerando emissões comparativas, como as emissões em aterros sanitários. Para cálculo das emissões de CH₄ na compostagem, a metodologia faz referência à ferramenta metodológica “*TOOL 13 - Project and leakage emissions from composting – Version 2.0*”, permitindo estimar as emissões através da ferramenta MDL TOOL 13.

Primeiramente, foi necessário determinar o fator de emissão (EF_{CH₄}). A ferramenta metodológica indica duas opções para determinar o fator de emissão, sendo selecionada neste estudo a “Opção 1: Procedimento usando dados monitorados”, onde a determinação é feita com base em medições das emissões de metano durante um ciclo de compostagem e é dada pela Equação 9.

$$EF_{CH_4,y} = \frac{\sum_{c=1}^x ECC_{CH_4}/Q_c}{x} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

EF_{CH₄,y} = Fator de emissão de metano por tonelada de resíduo compostado válido para o ano y (t CH₄/t);

ECC_{CH_4} = Emissões de metano da compostagem durante o ciclo de compostagem c (t CH₄);

Q_c = Quantidade de resíduo compostado no ciclo de compostagem c (t);

x = Número de ciclos de compostagem c para os quais as emissões foram medidas no ano y;

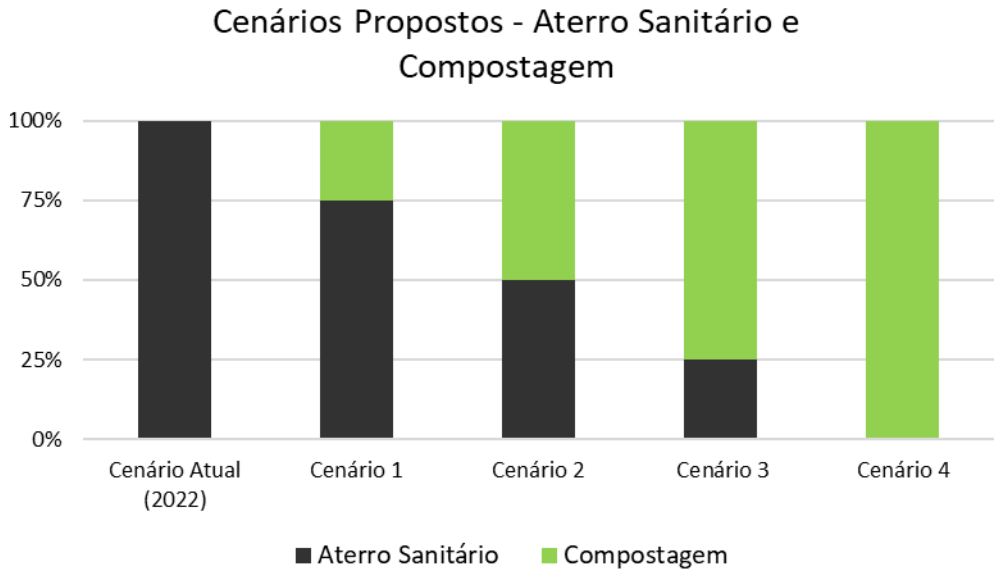
Na última fase, foi calculada a média e a mediana dos valores de fatores de emissão de metano (CH₄), para averiguar a veracidade e o comportamento dos resultados encontrados, comparando-os com outros estudos e aplicando resultados obtidos na ferramenta GHG Protocol.

3.3.2.2 Estimativa e análise das emissões de GEE por meio da ferramenta GHG Protocol

Para estimar as emissões de GEE utilizando a ferramenta GHG Protocol, considerou-se a quantidade de resíduos orgânicos gerados no município de Garopaba, no ano de 2022. Esses dados foram obtidos na etapa de diagnóstico dos resíduos sólidos do município, com base em informações do Plano Municipal de Saneamento Básico da Prefeitura Municipal de Garopaba (PMSG), do Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina (PERS/SC) e do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). A composição gravimétrica apresentada no PERS/SC é dividida em resíduos recicláveis, orgânicos e rejeitos. Assim, supõe-se que a categoria de resíduos orgânicos corresponda à fração de resíduos passíveis de compostagem.

Os cenários para a estimativa das emissões de GEE foram elaborados combinando diferentes porcentagens de resíduos orgânicos destinados à compostagem e ao aterro sanitário, com os quantitativos destinados à compostagem sendo aumentados gradativamente, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 26 - Cenários propostos para fins de cálculos de emissões na ferramenta GHG Protocol



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 3 apresenta as quantidades de resíduos orgânicos considerados para aterro sanitário e compostagem em cada um dos cenários, sendo o total sempre a quantidade total de resíduos orgânicos gerados em Garopaba (ano base-2022):

Tabela 3 - Quantidades de resíduos destinados ao aterro sanitário e à compostagem em cada um dos cenários propostos

	Cenário Atual (2022)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Quantidade de resíduos destinados ao aterro sanitário (t)	5.409,01	4.056,76	2.704,50	1.352,25	0,00
Quantidade de resíduos destinados à compostagem (t)	0,00	1.352,25	2.704,50	4.056,76	5.409,01
Total (t)	5.409,01	5.409,01	5.409,01	5.409,01	5.409,01

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para calcular e estimar as emissões relacionadas aos resíduos orgânicos destinados ao aterro sanitário e/ou compostagem, foi utilizada a ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol, versão 2024. Esta ferramenta é compatível com a norma ISO 14.064 e com as metodologias de cálculo do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

A metodologia do GHG Protocol abrange várias etapas para a elaboração de inventários de GEE, considerando os Escopos 1, 2 e 3. Para este estudo, foi selecionado o cálculo de emissões indiretas provenientes do tratamento de resíduos sólidos, indicados no Escopo 3, utilizando o ano-base 2022, que é o dado mais recente sobre a quantidade de resíduos gerados no município de Garopaba.

Na seção "Resíduos Aterrados", além das quantidades de resíduos destinados ao aterro sanitário em cada um dos cenários, foram inseridos dados na tabela de composição dos resíduos para as categorias "C – Resíduos Alimentares" e "E – Resíduos de Jardim e Parque". Como o PERS/SC não separa resíduos alimentares de resíduos de jardim e parque, foram utilizados dados de composição gravimétrica dos resíduos orgânicos do município de Florianópolis, que possui uma composição específica para essas duas categorias. Somadas, essas categorias apresentam uma composição próxima à dos resíduos orgânicos em Garopaba, conforme apresentado no PERS/SC. Aplicando-se uma regra de três, chegou-se nas porcentagens de 68,38% para resíduos alimentares e 31,62% para resíduos de jardim e parque.

Além disso, são necessários dados mais específicos sobre o aterro sanitário, como a classificação do aterro e se há recuperação de CH₄ com queima por *flare* ou utilização para geração de energia elétrica. No caso em estudo, o aterro sanitário é classificado como categoria "A" – que inclui controle do aterramento de resíduos, abrangendo ao menos um dos seguintes métodos: (i) material de cobertura; (ii) compactação mecânica; ou (iii) nivelamento do resíduo. Este aterro também possui recuperação de CH₄ por queima sem reaproveitamento de energia.

Para outros dados, como a concentração de biogás (fração de CH₄ no biogás) e a eficiência média de recuperação de metano no aterro, as células foram deixadas em branco, permitindo que a ferramenta utilize valores padrão estipulados pelo IPCC.

Na seção "Compostagem" da ferramenta, o único dado inserido nesta etapa foi a quantidade de resíduos destinados à compostagem, em toneladas por ano (t/ano). Outros elementos, como os fatores de emissão de CH₄ e N₂O, foram deixados em

branco. Assim, a ferramenta automaticamente utiliza os valores padrão fornecidos pelo IPCC.

Na segunda etapa deste estudo, foi utilizada a ferramenta GHG Protocol para avaliar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à compostagem de 1.004 kg de resíduos orgânicos, tratados na leira montada especificamente para este estudo. A análise focou na aba de resíduos, Escopo 3, da planilha do GHG Protocol, com ênfase exclusiva na compostagem.

Para comparação, foram empregados tanto o fator de emissão de metano padrão (*default*) da ferramenta quanto o fator de emissão de metano calculado na etapa 3.1.1. Esses fatores foram aplicados para estimar as emissões de CO₂e resultantes da compostagem de 1.004 kg de resíduos orgânicos. A ferramenta GHG Protocol permite a inclusão de um fator de emissão de metano específico, que foi inserido conforme resultado estabelecido na seção 4.2.1 com base na Equação 9 e na média dos resultados obtidos.

Nesta segunda etapa, então, foram considerados dois cenários para o total de resíduos compostados. No primeiro cenário, as emissões totais em CO₂e foram estimadas deixando a célula de fator de emissão em branco, o que levou a ferramenta a aplicar automaticamente o fator padrão do IPCC, de 0,004 tCH₄/t. No segundo cenário, foi inserido o fator de emissão médio calculado para a leira neste estudo, de 0,00086 tCH₄/t.

A comparação entre o fator de emissão padrão e o fator calculado neste estudo permite avaliar a precisão e a adequação dos fatores de emissão para a situação específica do município de Garopaba, considerando as características dos resíduos compostados e as condições de compostagem utilizadas.

3.3.3 Determinação da influência dos gases de efeito estufa, provenientes de compostagem, no aquecimento global

Os dados de emissões de gases de efeito estufa (GEE) quantificados por meio da ferramenta GHG Protocol, expressos em tCO₂e, foram utilizados para avaliar o impacto da redução dessas emissões sobre a variação da temperatura global. A abordagem metodológica adotada segue o modelo proposto por Luiz (2022), que se baseia no método desenvolvido por Ellis (2013).

O modelo de Ellis (2013) considera as variações nas emissões de GEE e seu impacto no aumento da temperatura global. A Equação 10, apresentada a seguir, descreve a relação entre a variação de temperatura e a concentração de CO₂ na atmosfera, expressa em partes por milhão (ppm):

$$\Delta T = 1,66 \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

ΔT = variação da temperatura global (°C);

C = concentração final de CO₂ (ppm);

C_0 = concentração inicial de CO₂ (ppm);

Esta equação representa a variação de temperatura (ΔT) resultante da alteração na concentração de CO₂ de C_0 para C . Os pesquisadores destacam que, para calcular o aumento de temperatura associado à mudança na concentração de CO₂ na atmosfera, é essencial considerar o balanço de energia. Isso ocorre porque o aumento na concentração de CO₂ torna a atmosfera menos transparente à radiação térmica, reduzindo a quantidade de calor refletido para o espaço em aproximadamente 4 W/m². Aplicando essa relação à equação mencionada, quando a concentração de CO₂ é duplicada ($C = 2 C_0$), o aumento de temperatura estimado é de cerca de 1,2 °C (Ellis, 2013).

Dado que os resultados gerados pelo GHG Protocol são fornecidos em tCO₂e, foi necessário convertê-los para ppm para aplicação na Equação 10. Considerando que 1 ppm de CO₂ é uma medida volumétrica, foi necessário trabalhar com mols durante os cálculos, convertendo para toneladas ao final. Segundo Trenberth e Smith (2005), a massa da atmosfera é estimada em 5,1480 x 10¹⁸ kg. Como o artigo mostra, esse valor deve ser cuidadosamente estimado, uma vez que o método comumente utilizado para calcular a massa da atmosfera, que envolve a multiplicação da pressão ao nível do mar pela área da Terra, pode superestimar essa massa ao desconsiderar a topografia. A composição atmosférica, faz com que sua massa molar seja 28,97 g/mol, o que resulta em aproximadamente 177,7 x 10¹⁸ mols na atmosfera. Dessa forma, 1 ppm equivale a 177,7 x 10¹² mols. Como 1 mol de CO₂ tem uma massa de

44,01 g, a massa correspondente a 1 ppm de CO₂ é de 7,821 bilhões de toneladas métricas.

Dado que o modelo de Ellis (2013) trabalha em uma escala global, foi realizada uma extrapolação das emissões reduzidas nos cenários estudados em Garopaba para a escala mundial. Essa extrapolação considerou a proporção entre a população de Garopaba e a população mundial, permitindo determinar o potencial impacto dos cenários analisados neste estudo em uma escala global. Como a equação 10 é aplicável à variação global de temperatura, a concentração de CO₂ inicial (C₀) considerada (em nível global) foi de 415 ppm (IPCC, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos na pesquisa.

4.1 LEVANTAMENTO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO DE GAROPABA

Os dados obtidos sobre os resíduos sólidos gerados em Garopaba mostram variações na geração e composição dos resíduos ao longo dos anos. A Tabela 4 apresenta a quantidade de resíduos recicláveis, orgânicos e rejeitos coletados no município entre 2017 e 2022.

Tabela 4 - Estimativa da quantidade de resíduos por fração em Garopaba – SC

Ano	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Quantidade de resíduos recicláveis (t)	6.019,71	6.104,13	6.411,96	6.899,71	6.713,56	6.668,41
Quantidade de resíduos orgânicos (t)	4.882,83	4.951,30	5.200,99	5.596,63	5.445,63	5.409,01
Quantidade de rejeitos (t)	2.894,65	2.935,24	3.083,27	3.317,81	3.228,29	3.206,58
Total de resíduos (t)	13.797,19	13.990,67	14.696,22	15.814,15	15.387,48	15.284,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Entre 2017 e 2022, o total de resíduos gerados em Garopaba aumentou de 13.797,19 toneladas para 15.284,00 toneladas, representando um crescimento de aproximadamente 10,8% ao longo do período analisado. A UNEP (2024) destaca que o aumento na geração de resíduos sólidos é uma tendência global, sendo 75% desse crescimento atribuído ao aumento do poder aquisitivo e 25% ao crescimento populacional, principalmente impulsionado pelo desenvolvimento econômico.

A análise dos dados anuais revela padrões e anomalias que podem ser importantes para a formulação de políticas públicas e estratégias futuras. Por exemplo, o aumento mais significativo na quantidade total de resíduos em Garopaba ocorreu entre 2019 e 2020, com um incremento de 7,6%. Esse crescimento pode estar

relacionado a mudanças demográficas causadas pela pandemia de COVID-19 ou ao aumento do poder aquisitivo da população local. Para fins de comparação, utilizou-se o Residuômetro de Florianópolis, produto desenvolvido por Luiz (2022). Diferente de Garopaba, o município de Florianópolis registrou uma queda anômala na coleta de resíduos em 2020, com 1.846 toneladas a menos coletadas em 2020 em comparação a 2019.

Em Garopaba, a quantidade de resíduos recicláveis apresentou um crescimento inicial, alcançando seu pico em 2020 com 6.899,71 toneladas. No entanto, após 2020, houve uma ligeira queda, reduzindo para 6.668,41 toneladas em 2022. Os resíduos orgânicos seguiram uma tendência de aumento consistente até 2020, subindo de 4.882,83 toneladas em 2017 para 5.596,63 toneladas. Após 2020, houve uma leve redução, chegando a 5.409,01 toneladas em 2022. Esse comportamento destaca a importância de implementar programas eficazes de compostagem e gerenciamento de resíduos orgânicos, considerando que representam uma fração significativa dos resíduos gerados. A quantidade de rejeitos também apresentou um aumento até 2020, passando de 2.894,65 toneladas em 2017 para 3.317,81 toneladas. Após esse pico, houve uma pequena redução, totalizando 3.206,58 toneladas em 2022.

De acordo com o Residuômetro de Luiz (2022), Florianópolis apresentou um aumento expressivo na coleta de resíduos orgânicos, passando de 2.843,00 toneladas em 2017 para 8.240,00 toneladas em 2022, representando um crescimento de 189,8%. Esse aumento significativo pode ser atribuído à implementação da Lei da Compostagem (Lei nº 10.501, de 08 de abril de 2019), que estabeleceu a obrigatoriedade da reciclagem de resíduos sólidos orgânicos no município de Florianópolis. Essa legislação, juntamente com políticas de separação e destinação adequada, reflete uma mudança substancial na gestão de resíduos orgânicos na capital de Santa Catarina.

A variação anual dos dados sugere que a coleta e o gerenciamento de resíduos em Garopaba são fortemente influenciados por fatores sazonais, como o aumento populacional durante a alta temporada turística. Esses dados destacam a importância de considerar as flutuações sazonais ao planejar e implementar estratégias e políticas de gestão de resíduos no município. Enquanto na baixa temporada são coletadas cerca de 800 toneladas de resíduos por mês, esse número sobe para 1.500 toneladas mensais durante a alta temporada (Garopaba, 2023).

Os dados apresentados são essenciais para a tomada de decisões no gerenciamento de resíduos sólidos em Garopaba. A quantidade e a composição dos resíduos destacam a necessidade de fortalecer programas de reciclagem, implementar programas de compostagem e melhorar a segregação de resíduos.

De acordo com Gomes (2021), em alguns bairros de Garopaba, há iniciativas pontuais da comunidade para realizar coleta seletiva e promover a reutilização ou reciclagem de resíduos orgânicos. Contudo, por meio de diálogos com membros da comunidade, constatou-se que, embora exista motivação, falta conhecimento técnico sobre o processo de reciclagem de resíduos orgânicos via compostagem. Muitas vezes, esses resíduos são enterrados diretamente no solo, criando um ambiente anaeróbico. Nesse cenário, a interação dos resíduos com a água pluvial gera chorume, biogás e acelera o apodrecimento dos materiais. Como resultado, o produto final não é um composto ou adubo orgânico, mas sim uma fração degradada de resíduos, pobre em nutrientes.

Com o crescimento na geração de resíduos orgânicos, a implementação de programas de compostagem pode reduzir significativamente a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários, promovendo uma gestão de resíduos voltada à sustentabilidade e à economia circular. Planejar estratégias de gestão que levem em conta as variações sazonais pode otimizar os recursos e melhorar a eficiência da coleta e tratamento de resíduos.

Além disso, Zago e Barros (2019) destacam que a valorização dos resíduos orgânicos pode contribuir para a solução de problemas ambientais graves, como a degradação do solo, a erosão e as mudanças climáticas. Cidades, empresas e o setor agrícola podem se beneficiar amplamente ao enxergar os resíduos sólidos orgânicos como um recurso valioso, transformando-os em adubo e/ou energia. Essa abordagem, além de gerar empregos, também contribui para a redução dos custos associados à disposição inadequada desses resíduos.

Esses dados servem como ponto de partida para análises futuras e a formulação de políticas públicas. O monitoramento contínuo e uma análise mais detalhada dos resíduos gerados podem permitir ajustes dinâmicos nas estratégias de gestão, promovendo a sustentabilidade ambiental e o bem-estar da comunidade de Garopaba. Esse diagnóstico reforça a importância de um planejamento integrado e da colaboração entre a administração pública, a população e os setores privados envolvidos na gestão de resíduos.

4.2 QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Neste subitem, são descritas as etapas de quantificação das concentrações de GEE realizadas na leira de compostagem, bem como a estimativa e análise das emissões de GEE utilizando a ferramenta de cálculo do GHG Protocol.

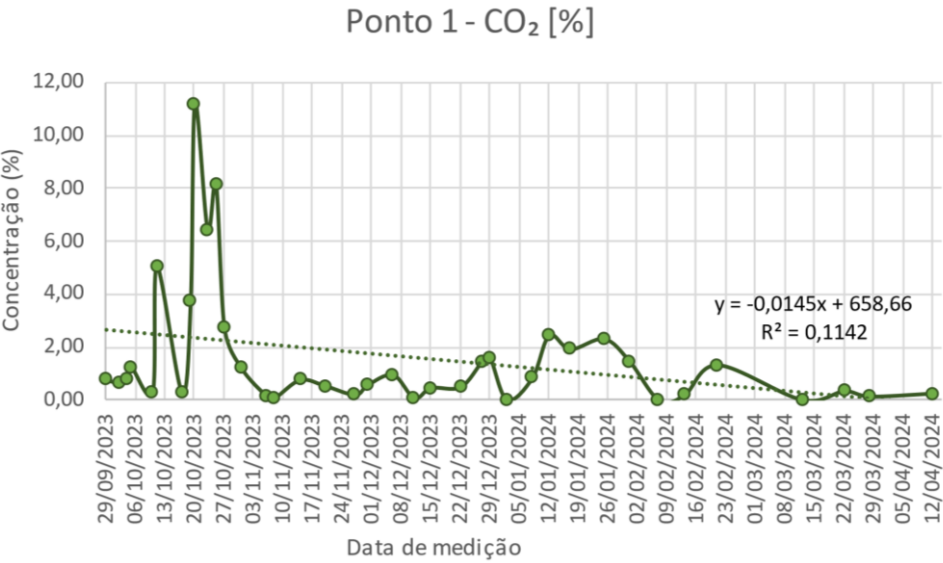
4.2.1 Quantificação e análise das concentrações de GEE em leira de compostagem

As Figuras 27, 28 e 29, mostram variação da concentração de CO₂ ao longo do período de 28 semanas nos pontos 1, 2 e 3 da leira de compostagem. Observa-se uma tendência geral de redução na concentração de CO₂ ao longo do tempo. Entretanto, foram registrados aumentos pontuais da concentração de CO₂ em dois períodos distintos durante o processo de compostagem.

Nos primeiros dias, houve um aumento na concentração de CO₂ até o 13º dia (11/10/2023), seguido por uma diminuição. Entre a terceira e quarta semanas de compostagem (a partir de 19/10/2023, 21º dia), ocorreu um aumento significativo na concentração, seguido de uma posterior queda, mantendo-se em baixos níveis com pequenas variações até atingir valores próximos a 0,0% ao final das 28 semanas.

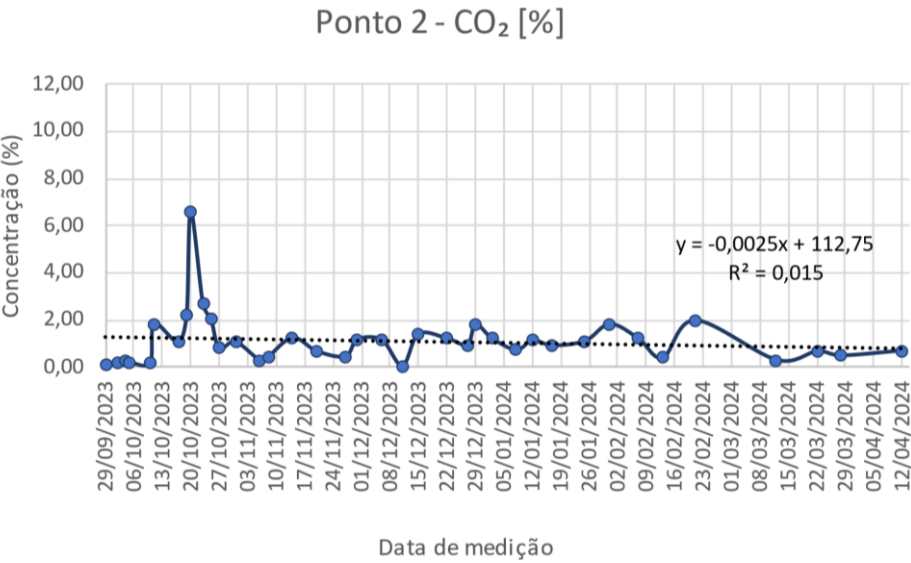
De acordo com Zhang *et al.* (2012), as emissões de CO₂ permanecem elevadas até o 8º dia de compostagem, que é o período de maior temperatura, e posteriormente declinam rapidamente. Os resultados encontrados neste estudo são semelhantes aos de Veras (2018), que realizou seu estudo em uma leira estática com mistura prévia de resíduos orgânicos e matéria seca, método bem semelhante ao adotado neste estudo. Segundo Veras, as maiores concentrações de dióxido de carbono foram constatadas no 5º e 12º dias, com 5,3%. Após 90 dias de compostagem, foram aferidas concentrações de 0,2% de dióxido de carbono.

Figura 27 - Concentrações de CO₂ (%) no Ponto 1 durante o período analisado



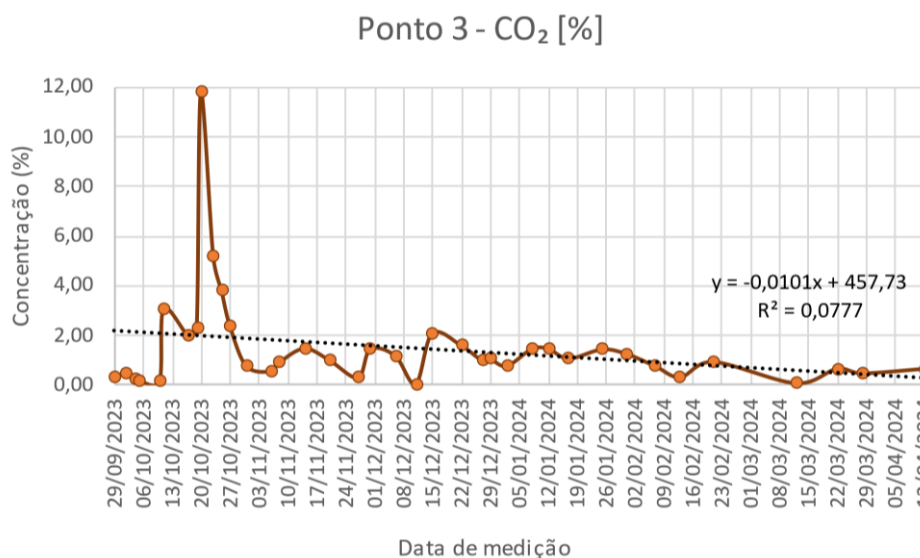
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 28 - Concentrações de CO₂ (%) no Ponto 2 durante o período analisado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 29 - Concentrações de CO₂ (%) no Ponto 3 durante o período analisado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os gráficos relativos à análise dos pontos 1, 2 e 3 da medição das concentrações de CH₄ na leira de compostagem são apresentados nas Figuras 31, 32 e 33.

No ponto 1, inicialmente observa-se uma baixa concentração de metano, seguida por um pico significativo em 20/10/2023 (22º dia), atingindo cerca de 0,9%. Após esse pico, houve uma queda acentuada na concentração, estabilizando-se em valores mais baixos com variações mínimas até o final do período de medição. A linha de tendência mostra uma redução na concentração de metano, com uma inclinação negativa de $y = -0,0014x + 63,547$ ao longo do tempo.

Da mesma forma, no ponto 2, também foi registrado um pico inicial na concentração de metano, atingindo seu valor máximo em 20/10/2023 (22º dia), aproximadamente 0,44%. Após esse pico, a concentração de metano diminuiu gradualmente, estabilizando-se em níveis inferiores. A linha de tendência para este ponto indica uma inclinação negativa de $y = -0,0007x + 31,817$, mostrando uma redução contínua na concentração de metano ao longo do período de observação.

O ponto 3 segue um padrão semelhante aos anteriores, com um pico significativo em 20/10/2023 (22º dia), onde a concentração de metano atingiu cerca de 0,5%. Após o pico, a concentração diminuiu e se estabilizou em níveis mais baixos. A linha de tendência associada a este ponto indica uma inclinação negativa de $y = -$

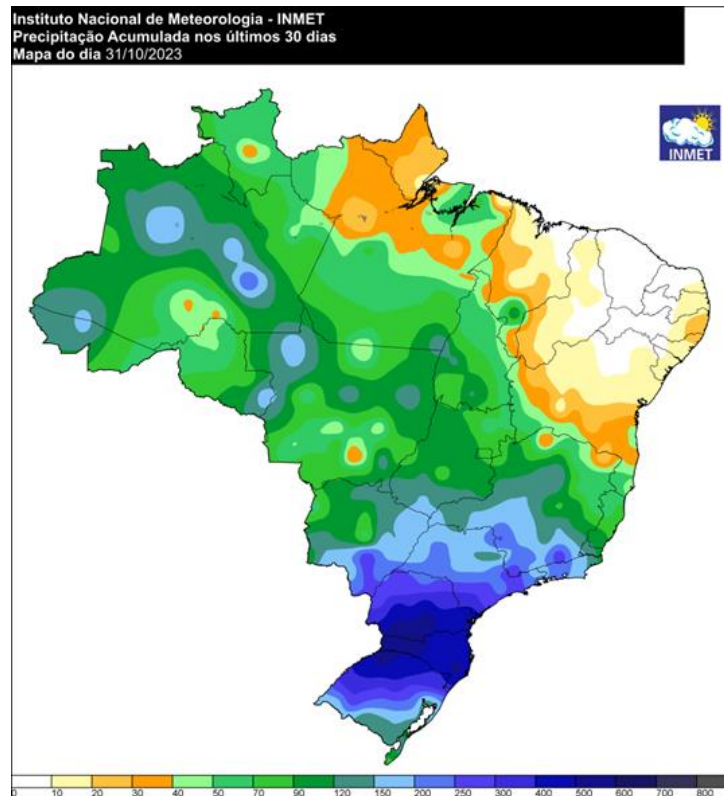
$0,0008x+34,894$, corroborando a tendência geral de redução na concentração de metano ao longo do tempo.

Em relação às porcentagens de concentração encontradas, no estudo realizado por Junior *et al.* (2017), o percentual de CH_4 variou entre 0,0% e 2,6%. Neste estudo, os resultados variaram entre 0,0% e 0,9%, considerando leiras com dimensionamento, composição e regime de aporte semelhantes. Essa diferença na geração de CH_4 é relativamente pequena, mas contrasta com os resultados de Inácio (2009), que encontrou concentrações médias de até 15% de CH_4 em áreas centrais de suas leiras. Essa discrepância pode estar relacionada à eficiência da aeração passiva obtida através dos materiais e estratégias de manejo adotados, e à diferença significativa de quantidade de resíduos orgânicos compostados no estudo de Inácio. É importante ressaltar que a geração de CH_4 está diretamente associada ao estabelecimento de condições anaeróbias nos resíduos orgânicos, geralmente relacionadas à alta de umidade e à baixa penetração de oxigênio (Jiang *et al.*, 2011).

Os picos iniciais observados em todos os pontos de medição são comuns em processos de compostagem, refletindo a intensa atividade microbiológica inicial. De acordo com Inácio (2010), tem sido demonstrado que as emissões de metano ocorrem preponderantemente na fase termofílica da compostagem, quando a atividade de biodegradação é intensa. No entanto, neste estudo, houve um período de elevada precipitação (332,4 mm até 19/10/2023, conforme dados do INMET), coincidindo com o aumento na concentração de CH_4 .

O mês de outubro de 2023 foi marcado por episódios de chuvas intensas, que causaram alagamentos, deslizamentos e impactos significativos na região Sul do Brasil, especialmente no Estado de Santa Catarina. Os volumes de chuva ultrapassaram a média histórica, como demonstrado na Figura 30, na qual as áreas mais chuvosas estão representadas em azul escuro, enquanto as menos chuvosas aparecem em verde claro/amarelo. As chuvas na Região Sul foram resultado da combinação de sistemas meteorológicos, como frentes frias e áreas de baixa pressão, somados aos efeitos do fenômeno El Niño. Chuvas localmente expressivas foram observadas, principalmente nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (INMET, 2023).

Figura 30 - Mapa do acumulado de precipitação (mm) em outubro de 2023



Fonte: INMET, 2023

O aumento da atividade microbiana misturado com alto teor de umidade pode resultar na formação de zonas anaeróbicas dentro da leira, resultando em emissões de CH_4 (Sánchez *et al.*, 2015), ou seja, este excesso de chuva registrado pode ter criado condições anaeróbicas, com baixa aeração, dificultando o processo de compostagem e resultando no aumento da concentração de CH_4 na leira deste estudo.

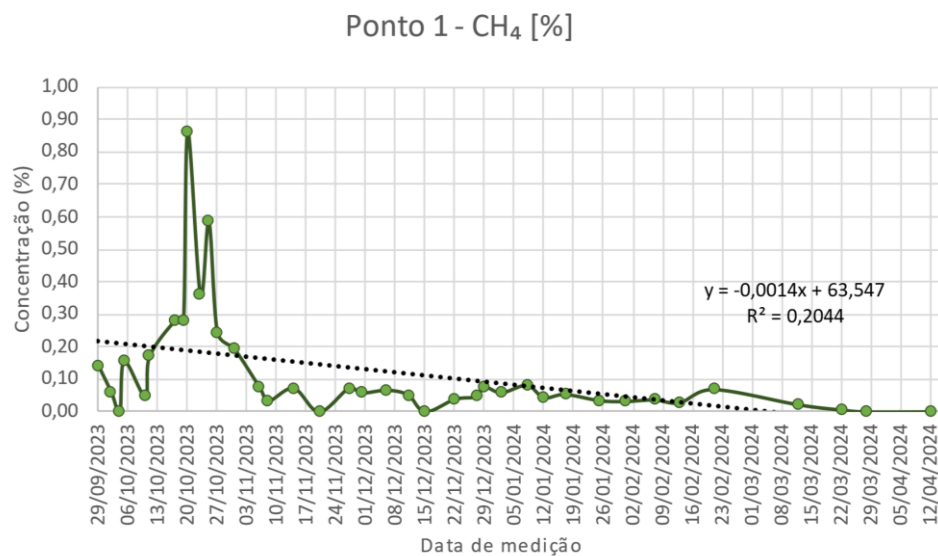
De acordo com Sayara e Sánchez (2021) o nível de aeração no processo de compostagem tem um impacto direto na emissão de metano. A aeração insuficiente pode levar à formação de zonas anaeróbicas, resultando em emissões significativas de CH_4 . Já uma aeração adequada reduz essas emissões, melhorando o controle sobre os gases liberados. O estudo de Jiang *et al.* (2011) também concluiu que a taxa de aeração é o fator mais importante na mitigação das emissões durante a compostagem, uma vez que taxas mais altas de aeração reduziram significativamente as emissões de CH_4 .

Segundo Nordahl *et al.* (2023), áreas localizadas de decomposição anaeróbica durante as operações de compostagem são inevitáveis. Nessas condições, os organismos metanotróficos desempenham um papel importante ao consumir o CH_4

que pode ser produzido em regiões anaeróbicas localizadas da pilha ou leira. Jäckel *et al.* (2005), em seu estudo, sugeriu que 46–98% do CH₄ produzido durante as operações de compostagem é consumido pelos organismos metanotróficos antes que ele possa escapar para a atmosfera.

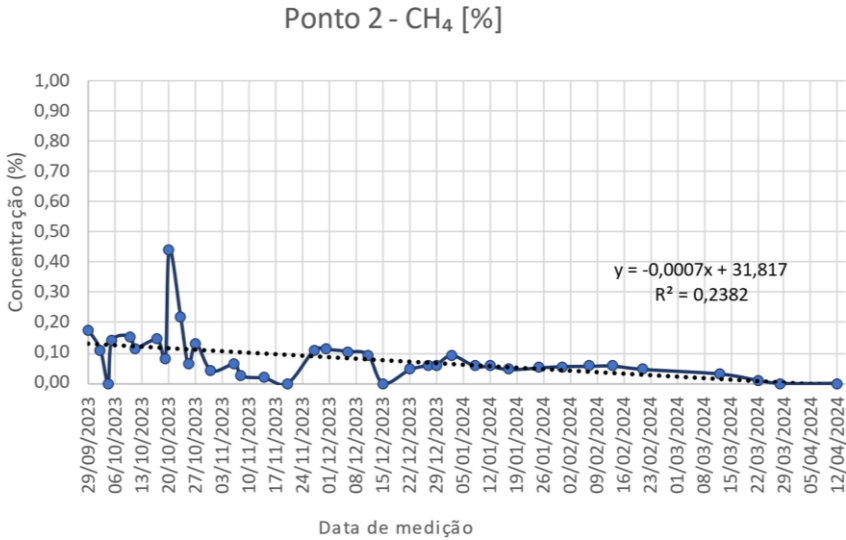
As linhas de tendência negativas em todos os pontos indicam uma diminuição geral na concentração de metano à medida que o tempo avança. Isso sugere que a compostagem está progredindo adequadamente e que a atividade microbiológica está se ajustando e se equilibrando ao longo do tempo. Após os picos iniciais, as concentrações de metano tendem a se estabilizar em níveis mais baixos, indicando uma possível transição de condições anaeróbicas iniciais para condições mais aeróbicas, menos propícias à produção de metano.

Figura 31 - Concentrações de CH₄ (%) no Ponto 1 durante o período analisado



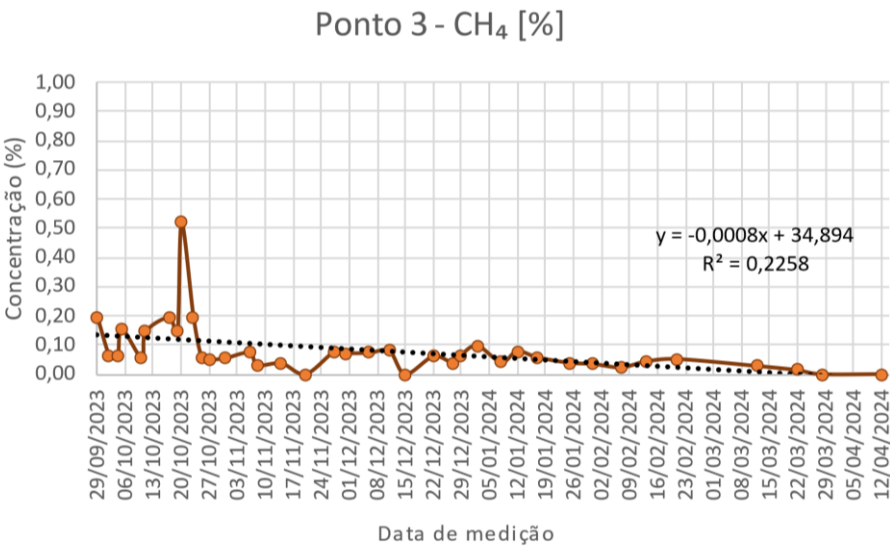
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 32 - Concentrações de CH₄ (%) no Ponto 2 durante o período analisado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 33 - Concentrações de CH₄ (%) no Ponto 3 durante o período analisado



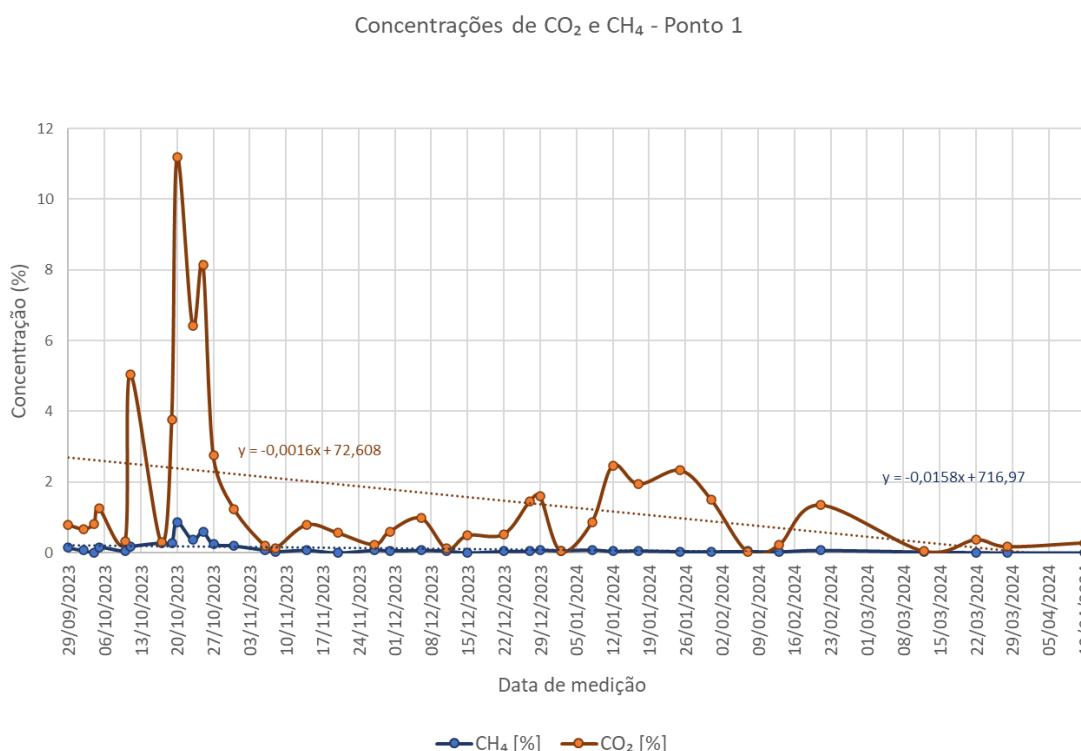
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise gráfica comparativa das concentrações de CO₂ e CH₄, no Ponto 1 por exemplo (Figura 34), ao longo do tempo revela importantes características do processo de compostagem. Observa-se que as concentrações de CO₂ são significativamente mais altas do que as de CH₄, o que é esperado, uma vez que a compostagem aeróbica favorece a produção de CO₂ devido à oxidação da matéria orgânica.

O gráfico da Figura 34 apresenta flutuações nas concentrações de CO₂, que podem ser atribuídas a variações na atividade microbiana e nas condições ambientais, como temperatura e umidade. Durante as fases iniciais da compostagem, há um aumento nas emissões de CO₂, indicando uma intensa atividade microbiana devido à disponibilidade de material facilmente degradável.

Em contrapartida, as concentrações de CH₄ são mais baixas e tendem a se estabilizar em níveis inferiores ao CO₂, o que reflete a predominância de condições aeróbicas na leira. No entanto, a presença de CH₄ sugere que, em determinados momentos ou regiões dentro da leira, as condições anaeróbicas podem prevalecer, levando à formação de metano (Zhang *et al.*, 2012).

Figura 34 - Concentrações de CO₂ e CH₄ no Ponto 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A partir dos dados de concentrações de GEE foi calculado o fator de emissão de CH₄ na leira estudada, o qual é um indicador para avaliar as emissões de GEE da compostagem. Os fatores de emissão de metano (CH₄) foram determinados para três pontos específicos na leira de compostagem, através da Equação 9, permitindo uma análise das variações na emissão de CH₄. A Tabela 5 apresenta os valores de fatores

de emissão de CH₄ (em toneladas de CH₄ por tonelada de resíduos orgânico compostado) ao longo do período de monitoramento.

Os resultados mostram que o Ponto 1 apresentou os maiores valores médios de emissão de CH₄ (0,00110 tCH₄/t), enquanto os Pontos 2 e 3 apresentaram valores médios menores, 0,00076 tCH₄/t e 0,00074 tCH₄/t, respectivamente. Isso pode ser atribuído a diferenças nas condições microambientais dos pontos, como variações na oxigenação, umidade e compactação do material compostado. A presença de valores ausentes ("-") em alguns pontos indica que, durante certas medições, as condições no ponto não eram propícias para a formação de CH₄, pois o aparelho não detectou concentrações desse gás.

A análise das medianas dos fatores de emissão indica que, em geral, as emissões foram consistentes entre os pontos, com valores medianos próximos (aproximadamente 0,00050 tCH₄/t), sugerindo uma relativa uniformidade no comportamento da leira sob as condições experimentais.

Os fatores de emissão observados refletem a dinâmica da compostagem e a interação complexa entre condições aeróbicas e anaeróbicas. O maior valor médio no Ponto 1 pode sugerir uma maior proporção de condições anaeróbicas temporárias nesse local, possivelmente devido a diferenças na distribuição de material ou na frequência de aeração.

A média do fator de emissão de CH₄ calculada para a leira como um todo foi de 0,00086 tCH₄/t, ou 860 gCH₄/t. Esse valor está dentro das faixas reportadas na literatura para diferentes operações de compostagem com tipologia de resíduos orgânicos semelhantes.

De acordo com Nordahl *et al.* (2023), uma revisão abrangente de 46 estudos sobre fatores de emissão na compostagem revelou uma média de 0,000879 tCH₄/t. Essa revisão incluiu operações de compostagem em diferentes escalas, tipologias de resíduos e estratégias de manejo. O fator de emissão médio reportado neste estudo (0,00086 tCH₄/t) é muito semelhante ao apresentado por Nordahl *et al.* (2023), sugerindo que as estimativas obtidas são consistentes entre diferentes contextos e metodologias. Isso reforça a confiabilidade desses valores como referência para avaliar as emissões de metano provenientes da compostagem.

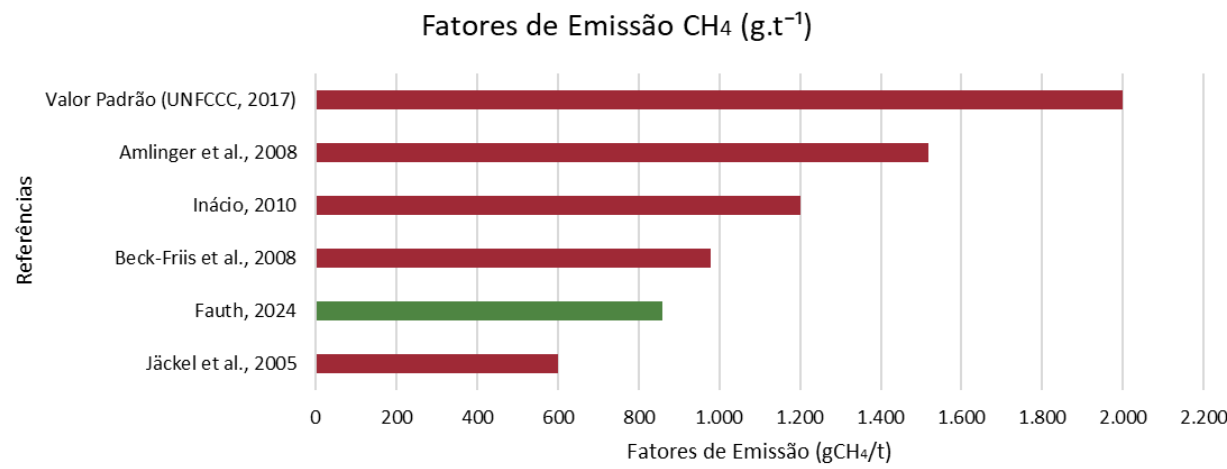
Tabela 5 - Fatores de emissão de CH₄ calculados nos Pontos 1, 2 e 3

Medição	Fatores de emissão determinados (tCH ₄ /t)		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
1	0,00135	0,00165	0,00184
2	0,00058	0,00105	0,00058
3	-	-	0,00058
4	0,00148	0,00132	0,00147
5	0,00044	0,00145	0,00052
...	...	...	...
34	0,00064	0,00042	0,00048
35	0,00021	0,00029	0,00026
36	0,00006	0,00009	0,00013
37	-	-	-
38	-	-	-
Média	0,00110	0,00076	0,00074
Mediana	0,00054	0,00053	0,00054

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Diferentes fatores de emissão podem ser encontrados na literatura, e eles podem variar bastante dependendo das características da matéria-prima ou da tecnologia de compostagem adotada (Sayara; Sánchez, 2021). A Figura 34 e a Tabela 6 sintetizam e apresentam os dados da literatura, referências deste estudo, que determinaram o fator de emissão (EF) de metano (CH₄) em relação à quantidade de resíduos compostados (MF - Massa Fresca de Resíduos), utilizando distintas metodologias e tipologias de resíduos. Para este trabalho, é relevante comparar os valores de EF CH₄ encontrados neste estudo com aqueles reportados em outros estudos da literatura. Na Figura 34, os fatores de emissão reportados na literatura estão organizados do maior para o menor, sendo o maior fator de emissão, o valor padrão estabelecido pela UNFCCC na ferramenta Metodológica - Emissões de Projeto e Vazamento de Compostagem (*TOOL 13 - Project and leakage emissions from composting – Version 2.0*), que utiliza valores default considerados conservadores para fins de cálculo. Já na Tabela 6, os fatores de emissão estão organizados por data de publicação, com exceção do valor padrão da UNFCCC, que foi colocado ao final da tabela para melhor comparação com os outros resultados.

Figura 35 - Comparação dos fatores de emissão de metano (g CH₄.t⁻¹), considerando dados da literatura (referências deste estudo)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 6 - Comparação dos fatores de emissão de metano em diferentes técnicas de compostagem, quantidade de resíduos e metodologias de medição

Referência	Metodologia de Medição	Tipologia de Resíduos	Técnica de Compostagem	MF - Quantidade de Resíduos Compostados (kg)	EF CH ₄ (g.t ⁻¹ MF)
Fauth, 2024	Câmara estática e analisador de gás portátil (Infravermelho)	Restos de alimentos, palha seca e serragem	Leira estática	1.004	860
Inácio, 2010	Câmara estática e analisador de gás portátil (Infravermelho)	Restos de comida, aparas de grama, cama-de-cavalo	Leira estática	32.000	1.200
Amlinger <i>et al.</i> , 2008	Câmara dinâmica e Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier	Restos de alimentos	Leira revolvida	5.800	293
		Restos de alimentos e resíduos de parques e jardins	Leira estática	1.775	1.517
Beck-Friis <i>et al.</i> , 2008	Câmara estática e cromatografia de fase gasosa	Restos de alimentos e resíduos de parques e jardins	Leira revolvida	110.000	4.231
			Leira revolvida	2.150	979
Jäckel <i>et al.</i> , 2005	Câmara estática e cromatografia de fase gasosa	Restos de alimentos e resíduos de parques e jardins	Leira revolvida	81.000	420 a 600
UNFCC, 2017	É o fator de emissão padrão na UNFCCC. É determinado com base em estudos e revisões da literatura sobre medições em instalações de compostagem, utilizando dados recentes e de alta qualidade, e selecionando conservadoramente um valor da faixa mais alta dos resultados.				2000

Fonte: Adaptado de Inácio (2010)

Neste estudo, utilizou-se uma câmara estática e um analisador de gás portátil com tecnologia de infravermelho para monitorar as emissões de metano. A tipologia dos resíduos compostados incluiu restos de alimentos, palha seca e serragem, utilizando a técnica de leira estática com aeração passiva. O fator de emissão de metano encontrado foi de 860 g/t MF para uma quantidade de 1.004 kg de resíduos compostados. Este valor pode ser comparado ao encontrado por Inácio (2010), que utilizou uma metodologia semelhante (câmara estática e analisador de gás portátil com tecnologia infravermelho) e adotou a técnica de leira estática. No entanto, Inácio (2010) reportou um EF CH₄ mais elevado, de 1.200 g/t MF, para uma quantidade de 32.000 kg de resíduos, compostos por restos de comida, aparas de grama e cama-de-cavalo. A diferença nos valores de EF CH₄ pode ser atribuída, em parte, à tipologia dos resíduos e à quantidade significativamente maior de material compostado no estudo de Inácio (2010).

Por outro lado, Amlinger *et al.* (2008) utilizaram uma câmara dinâmica e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier para medir as emissões de metano em diferentes configurações de compostagem. Para resíduos de alimentos compostados em leira revolvida, o EF CH₄ encontrado foi de 293 g/t MF, um valor consideravelmente mais baixo do que o deste estudo. No entanto, para resíduos de alimentos e resíduos de parques e jardins compostados em leira estática, o EF CH₄ foi de 1.517 g/t MF, um valor superior ao encontrado neste estudo. Estes dados indicam que a técnica de revolvimento da leira pode ter um efeito significativo na redução das emissões de metano, evidenciando a importância da escolha da técnica de compostagem no controle das emissões.

Outro estudo relevante é o de Beck-Friis *et al.* (2008), que utilizou câmara estática e cromatografia de fase gasosa para medir as emissões de metano em resíduos compostados em leira revolvida. Neste caso, o fator de emissão foi mais elevado, atingindo 4.231 g/t MF para uma quantidade de 110.000 kg de resíduos compostados. Este valor sugere que, além da técnica de compostagem, a escala da operação também pode influenciar significativamente as emissões, com grandes quantidades de resíduos potencialmente gerando maiores volumes de metano.

Adicionalmente, Jäckel *et al.* (2005), utilizando metodologia similar à de Beck-Friis *et al.* (2008), reportaram valores de EF CH₄ entre 420 e 600 g/t MF para resíduos compostados em leira revolvida, o que é inferior ao valor encontrado neste estudo.

Isso reforça a observação de que o revolvimento da leira pode ser um fator mitigador das emissões de metano.

Por fim, o valor padrão de EF CH₄ estabelecido pela UNFCCC (2017), que é de 2.000 g/t MF, foi determinado com base em uma ampla revisão de estudos e medições em instalações de compostagem, utilizando dados de alta qualidade. Este valor é conservador e situado na faixa mais alta dos resultados encontrados na literatura, o que visa evitar a subestimação das emissões em inventários nacionais de gases de efeito estufa.

Em síntese, o fator de emissão de metano determinado neste estudo (860 g/t MF) encontra-se em uma faixa intermediária quando comparado com outros estudos. A técnica de compostagem escolhida, a tipologia dos resíduos orgânicos e a metodologia de medição, são fatores que podem influenciar nos resultados. Em particular, a comparação com estudos que utilizaram leiras revolvidas evidencia que esta técnica pode ser mais eficaz na redução das emissões, sugerindo que o revolvimento das leiras pode ser uma prática recomendada para a mitigação das emissões de metano em operações de compostagem.

De acordo com Sánchez *et al.* (2015) para o processo de compostagem acontecer com emissões de GEE mínimas, o descarte do material em pilhas com tamanho e porosidade adequados é o segredo para favorecer a distribuição homogênea de oxigênio. Além da estrutura física da leira, a mistura de resíduos a ser compostada deve apresentar um teor de umidade adequado e uma proporção equilibrada de C/N biodegradável. Além disso, as atividades operacionais que envolvem consumo de eletricidade ou combustível podem também ser otimizadas para reduzir o impacto ambiental geral do processo.

Esses resultados destacam a importância de otimizar as condições de compostagem para minimizar a produção de metano. Melhorias no manejo, como a otimização da aeração e o monitoramento contínuo das condições ambientais, podem ser implementadas para reduzir ainda mais o impacto ambiental da compostagem.

4.2.2 Estimativa e análise das emissões de GEE por meio da ferramenta GHG Protocol

Esta seção apresenta a análise dos resultados obtidos a partir da comparação da quantidade de resíduos orgânicos e das emissões de GEE nos diferentes cenários propostos para o gerenciamento de resíduos orgânicos, utilizando a ferramenta GHG Protocol. A Tabela 7 apresenta os principais dados utilizados na ferramenta, demonstrando a quantidade dos resíduos orgânicos destinados ao aterro sanitário e à compostagem, bem como as emissões de GEE associadas a cada cenário.

Tabela 7 - Quantidade de resíduos e emissões de GEE nos diferentes cenários

		Cenários			
	Atual (2022)	1	2	3	4
Quantidade de resíduos orgânicos destinados à compostagem (t/ano)	0,00	1.352,25	2.704,50	4.056,76	5.409,01
Quantidade de resíduos orgânicos destinados ao aterro sanitário (t/ano)	5.409,01	4.056,76	2.704,50	1.352,25	0,00
Total (t/ano)	5.409,01	5.409,01	5.409,01	5.409,01	5.409,01
Emissões de resíduos orgânicos na compostagem (tCO ₂ e/ano)	0,00	237,46	474,91	712,37	949,82
Emissões de resíduos orgânicos no aterro sanitário (tCO ₂ e/ano)	8.414,43	6.310,82	4.207,21	2.103,61	0,00
Total (tCO₂e/ano)	8.414,43	6.548,27	4.682,12	2.815,97	949,82

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os cenários foram projetados para avaliar o impacto da transição gradual dos resíduos orgânicos do aterro sanitário para a compostagem. Conforme apresentado na Tabela 7, o Cenário Atual (2022) reflete a situação presente, onde 100% dos

resíduos orgânicos são enviados ao aterro sanitário. Nos cenários subsequentes (1 a 4), há um aumento progressivo da quantidade de resíduos destinados à compostagem, culminando no Cenário 4, onde 100% dos resíduos orgânicos são compostados. Essa mudança de destinação tem implicações significativas nas emissões de gases de efeito estufa. Firmo *et al.* (2019) destaca que a reciclagem de resíduos orgânicos por meio da compostagem oferece uma dupla vantagem: por um lado, há o desvio dos resíduos do aterro sanitário, reduzindo a presença de materiais biodegradáveis que produzem metano em condições anaeróbicas; por outro, a reciclagem desses resíduos resulta na produção de composto, o que gera benefícios adicionais na redução de GEE ao substituir a extração e o processamento de matérias-primas, como fertilizantes.

No cenário Atual (2022), observa-se que a totalidade dos resíduos orgânicos gerados, equivalente a 5.409,01 toneladas, é destinada ao aterro sanitário. Este cenário resulta em emissões totais de GEE de 8.414,43 tCO₂e/ano. As emissões elevadas são decorrentes do processo de decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos no aterro sanitário, que gera metano, um potente GEE. A literatura aponta, consistentemente, que a disposição em aterros é a opção menos atraente no que diz respeito às emissões de GEE. Nordahl *et al.* (2020) reforçam essa conclusão com seus resultados sobre emissões de GEE, destacando que as emissões fugitivas de metano são o principal fator na pegada de GEE dos resíduos orgânicos. Em qualquer cenário em que os orgânicos sejam depositados em aterros, resultará em emissões mais altas de GEE.

Com a implementação do Cenário 1, 1.352,25 toneladas de resíduos orgânicos são destinadas à compostagem, enquanto 4.056,76 toneladas continuam a ser enviadas ao aterro sanitário. Este cenário resulta em uma redução significativa das emissões totais de GEE, que caem para 6.548,27 tCO₂e/ano. As emissões provenientes da compostagem somam 237,46 tCO₂e/ano, enquanto as emissões do aterro sanitário reduzem para 6.310,82 tCO₂e/ano. A diminuição nas emissões totais reflete a menor quantidade de resíduos destinados ao aterro sanitário e o menor impacto da compostagem em termos de emissões de GEE.

No Cenário 2, a quantidade de resíduos compostados aumenta para 2.704,50 toneladas, e, conseqüentemente, os resíduos destinados ao aterro sanitário diminuem para 2.704,50 toneladas. As emissões totais de GEE neste cenário são reduzidas para 4.682,12 tCO₂e/ano. As emissões da compostagem são de 474,92 tCO₂e/ano, e as

emissões do aterro sanitário caem para 4.207,20 tCO₂e/ano. A crescente destinação dos resíduos à compostagem continua a contribuir para a redução das emissões de GEE.

O Cenário 3 propõe a compostagem de 4.056,76 toneladas de resíduos orgânicos, deixando apenas 1.352,25 toneladas para serem enviadas ao aterro sanitário. As emissões totais de GEE neste cenário são de 2.815,96 tCO₂e/ano, com 712,38 tCO₂e/ano provenientes da compostagem e 2.103,58 tCO₂e/ano do aterro sanitário. A tendência de redução das emissões de GEE se intensifica à medida que a compostagem se torna a principal forma de destinação dos resíduos orgânicos.

No Cenário 4, a totalidade dos resíduos orgânicos gerados (5.409,01 toneladas) é destinada à compostagem, eliminando completamente o envio de resíduos ao aterro sanitário. Este cenário resulta nas menores emissões totais de GEE, contabilizando 949,82 tCO₂e/ano, todas provenientes do processo de compostagem. Não há emissões associadas ao aterro sanitário, uma vez que nenhum resíduo, neste cenário, é destinado a essa forma de disposição final.

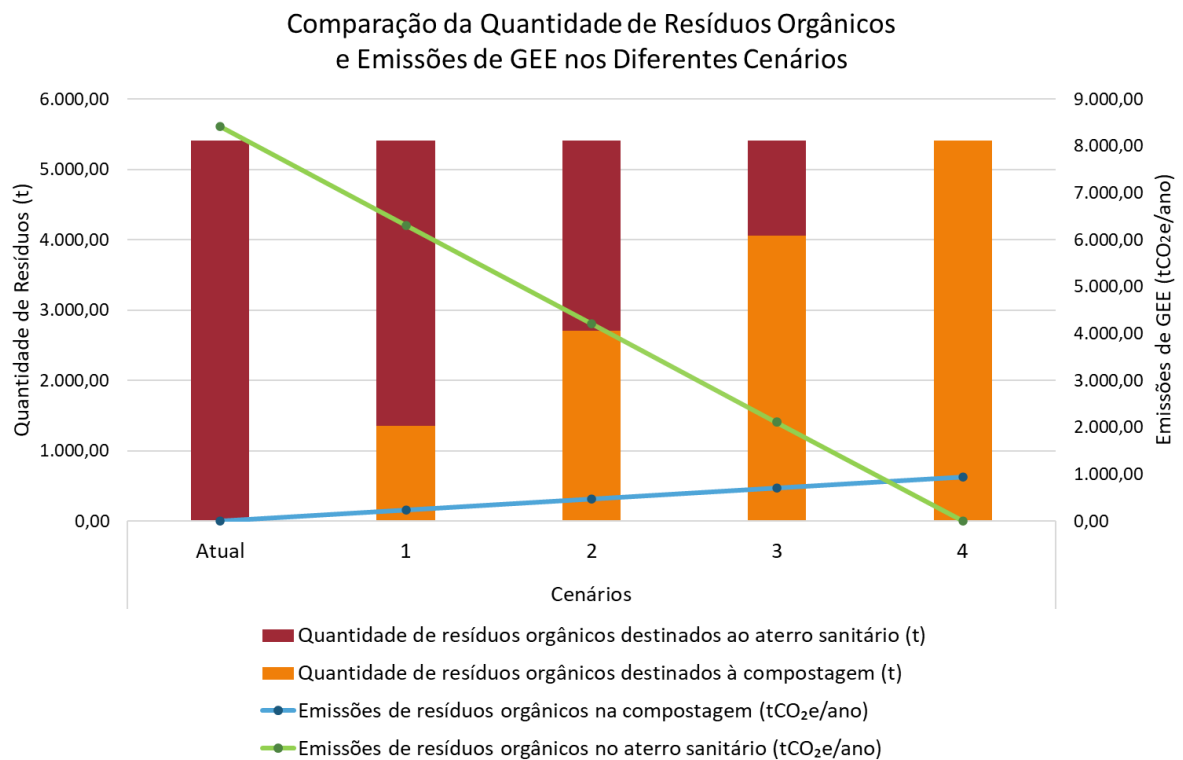
A análise dos cenários destaca a importância da compostagem na redução das emissões de GEE associadas aos resíduos orgânicos. A transição do cenário Atual (2022) para o Cenário 4 resulta em uma redução de aproximadamente 88,7% nas emissões totais de GEE. Essa significativa diminuição ocorre porque a compostagem gera consideravelmente menos emissões de GEE em comparação com a disposição em aterros sanitários. O resultado encontrado é consistente com o estudo de Santos (2020), que, apesar de usar uma metodologia diferente – a MDL AMS-III.F – *Avoidance of Methane Emissions through Composting – Version 12.0*, encontrou uma redução de 83,5% nas emissões de GEE ao desviar a mesma quantidade de resíduos orgânicos do aterro sanitário para a compostagem.

Diversos estudos demonstraram que a compostagem emite significativamente menos GEE do que o aterro sanitário e a incineração. Lou e Nair (2009) compararam as emissões de GEE provenientes da compostagem e do aterramento de resíduos orgânicos, concluindo que o aterramento resulta em emissões de GEE mais altas em comparação com a compostagem, uma conclusão que reflete o consenso geral na comunidade de pesquisa.

A Figura 35 ilustra claramente a redução progressiva das emissões de GEE à medida que a quantidade de resíduos destinada à compostagem aumenta. No Cenário Atual (2022), onde todos os resíduos são enviados ao aterro sanitário, as

emissões são extremamente altas devido à geração de metano. Nos cenários subsequentes, observa-se uma redução nas emissões totais à medida que mais resíduos são desviados para a compostagem, um processo que emite significativamente menos GEE.

Figura 36 - Gráfico comparativo dos resultados obtidos na ferramenta GHG Protocol



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados apresentados demonstram que a implementação de estratégias de compostagem pode ter um impacto substancial na redução das emissões de GEE associadas ao gerenciamento de resíduos orgânicos. A transição gradual através dos diferentes cenários propostos oferece uma abordagem prática e incremental para a implementação da compostagem, proporcionando resultados mensuráveis em termos de redução de emissões. Estes achados destacam a compostagem como uma solução sustentável, evidenciando sua importância na formulação de políticas públicas voltadas para a gestão de resíduos sólidos urbanos.

Firmo *et al.* (2019) afirma que, ao avaliar as políticas de resíduos sob uma ótica transversal, reconhece-se seu papel não apenas no contexto das mudanças climáticas, mas também na busca por metas globais relacionadas ao saneamento, à

energia acessível e limpa, à inovação e infraestrutura, às cidades sustentáveis, e à produção e consumo responsáveis — todos alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU).

Os resultados sugerem que políticas e práticas que incentivem a compostagem de resíduos orgânicos podem ser eficazes na mitigação das mudanças climáticas. No entanto, é essencial considerar também os custos, a infraestrutura necessária e a aceitação pública dessas práticas para garantir uma implementação bem-sucedida. A transição para a compostagem requer planejamento e investimento, mas os benefícios ambientais, especialmente em termos de redução de emissões de GEE, podem ser significativos.

De acordo com Luiz (2022), a alternativa de tratamento dos resíduos orgânicos por meio da compostagem resulta em eficiência energética não apenas considerando a produção de gases durante o processo de decomposição, pois a aplicação do composto orgânico resultante aumenta a qualidade do solo, resultando em menor quantidade necessária de fertilizantes sintéticos, e, também, diminui a erosão do solo e reduz o uso de herbicidas.

Embora esta primeira etapa foque nas emissões gasosas durante o próprio processo de compostagem, excluindo o transporte por caminhão e a queima de combustíveis para operar os equipamentos, os fatores de emissão da compostagem são mais significativos em um contexto mais amplo, onde cada processo completo de gerenciamento de resíduos orgânicos pode ser comparado. Mancini et al. (2022) aplicaram uma ferramenta específica para compostagem a fim de avaliar a pegada de carbono do processo. A ferramenta utilizada por Mancini et al. (2022) é baseada na abordagem do ciclo de vida, alinhada às normas internacionais, incluindo o GHG Protocol, as diretrizes do IPCC e a série de normas ISO 14040.

Para a contabilização das emissões de GEE na compostagem, o estudo de Mancini et al. (2022) considerou diversas atividades, abrangendo os três escopos definidos pelo GHG Protocol: (i) consumo de energia e materiais auxiliares; (ii) emissões diretas de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) relacionadas às atividades de compostagem. Apenas as emissões atmosféricas de gases que potencialmente contribuem diretamente para o aquecimento global, como CH_4 , N_2O e CO_2 , foram consideradas. No entanto, devido à natureza biogênica do CO_2 , que é considerado neutro em relação ao aquecimento global, este gás não é incluído na contabilização;

(iii) emissões relacionadas ao tratamento de resíduos originados dos processos de compostagem; e (iv) emissões decorrentes do transporte de insumos, produtos e resíduos. A análise abrangeu tanto o uso direto de energia quanto as emissões associadas ao transporte de materiais, refletindo a complexidade das atividades envolvidas no processo de compostagem.

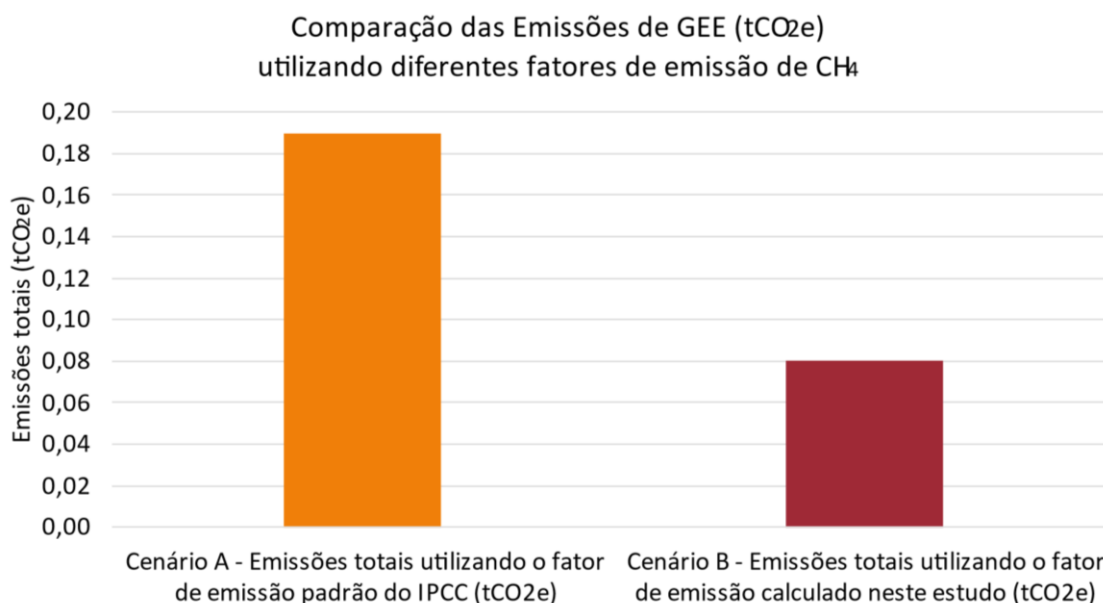
Na segunda etapa do uso da ferramenta GHG Protocol, foram considerados dois cenários para o total de 1,004 toneladas de resíduos orgânicos compostados neste estudo. No primeiro cenário, utilizou-se o fator de emissão de metano padrão do IPCC, enquanto no segundo, aplicou-se o fator de emissão de metano específico calculado para a leira neste estudo. Os resultados desses cenários são apresentados na Tabela 8 e na Figura 36.

Tabela 8 - Resultados no cenário comparativo com os diferentes fatores de emissão de CH₄

	Cenários	
	A	B
Quantidade de resíduos orgânicos destinados à compostagem (t)	1,004	1,004
Emissões totais utilizando o fator de emissão padrão do IPCC (tCO ₂ e)	0,19	-
Emissões totais utilizando o fator de emissão calculado neste estudo (tCO ₂ e)	-	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 37 - Resultados no cenário comparativo com os diferentes fatores de emissão de CH₄



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados obtidos indicam que a utilização de fatores de emissão calculados especificamente para condições locais pode ter implicações significativas para a gestão e mitigação das emissões de GEE. A diferença considerável entre as emissões totais estimadas com o fator de emissão padrão do IPCC na ferramenta GHG Protocol, que resultou em 0,19 toneladas de CO₂e, e o fator calculado neste estudo, que totalizou 0,08 toneladas de CO₂e, sugere que o fator padrão pode superestimar as emissões em determinadas situações. A estimativa de emissões com o fator padrão é cerca de 137,5% maior do que a estimativa com o fator específico do estudo.

Santos (2020) afirma que as estimativas de emissões de metano provenientes da compostagem em sua pesquisa poderiam ser ainda menores se fossem utilizados fatores de emissão específicos, uma vez que o fator padrão é considerado conservador. No entanto, as ferramentas de cálculo recomendam que, na ausência de campanhas de medição no local, sejam utilizados os fatores de emissão predefinidos pela própria ferramenta.

Essa superestimação pode ter impactos diretos nas políticas de gestão de resíduos e nas estratégias de mitigação de emissões. Por exemplo, ao utilizar o fator *default*, gestores e tomadores de decisão podem implementar medidas que são mais rigorosas ou custosas do que o necessário, baseando-se em uma estimativa

inflacionada das emissões. Por outro lado, ao adotar fatores de emissão ajustados às condições locais, é possível obter uma visão mais realista e precisa das emissões, permitindo o desenvolvimento de estratégias de mitigação mais eficientes e custo-efetivas.

Além disso, os resultados ressaltam a importância de realizar estudos locais para a determinação de fatores de emissão, especialmente em contextos em que as condições podem variar significativamente das consideradas nos cálculos globais do IPCC. Fatores como o tipo de resíduo, as condições climáticas, e os processos específicos de compostagem podem influenciar diretamente as taxas de emissão de metano (CH_4), e, conseqüentemente, as estimativas de GEE. No processo de compostagem, a quantidade de gases emitidos é altamente influenciada pelo tipo de resíduos tratados, tecnologia de compostagem e condições operacionais, principalmente a aeração, que tem um impacto direto na redução da taxa de emissões, principalmente do metano (Sayara; Sánchez, 2021). Portanto, a personalização dos fatores de emissão aprimora a precisão das estimativas, e também contribui para a construção de políticas ambientais mais sustentáveis e adaptadas à realidade local.

Nordahl *et al.* (2023) ressaltam que determinar fatores definitivos e amplamente aplicáveis para a emissão de GEE na compostagem de resíduos orgânicos é desafiador, uma vez que as emissões podem variar significativamente devido a diversos fatores além do tipo de resíduo compostado. Entre esses fatores, destacam-se: condições climáticas locais no local de compostagem; método e duração da compostagem; método e frequência de aeração; uso de materiais estruturantes para fornecer estrutura às leiras e facilitar a aeração; bem como a relação carbono-nitrogênio da mistura, o teor de umidade e o pH dos materiais de origem.

Em resumo, a análise realizada sugere que, para alcançar uma gestão ambiental mais eficaz, é importante considerar a aplicação de fatores de emissão específicos ao contexto estudado, ao invés de se basear exclusivamente em padrões globais. Isso não apenas aprimora a precisão das estimativas, mas também permite uma alocação mais eficiente de recursos nas estratégias de mitigação de emissões, contribuindo de forma mais eficaz para a redução dos impactos ambientais.

4.3 DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS GASES DE EFEITO ESTUFA, PROVENIENTES DE COMPOSTAGEM, NO AQUECIMENTO GLOBAL

A partir dos resultados obtidos nos cenários do GHG Protocol, foram aplicados os cálculos descritos na metodologia, método Ellis (2013), Equação 10, com o objetivo de estimar a contribuição dos cenários propostos na variação da temperatura global. Para realizar tal análise foi necessário extrapolar os resultados obtidos para a escala global, considerando a proporção da população mundial em relação à população local de Garopaba. Isso foi feito para que fosse possível estimar a influência das emissões de GEE, assumindo que as reduções de emissões observadas localmente fossem aplicadas globalmente.

Os resultados, apresentados na Tabela 9, mostram as reduções nas concentrações de gases de efeito estufa (GEE), expressas em partes por milhão (ppm), e a correspondente variação de temperatura (ΔT) tanto para Garopaba quanto em uma escala global.

Tabela 9 - Redução nas Concentrações de GEE (ppm) na atmosfera e Variação de Temperatura (ΔT) em Garopaba e Globalmente

	Cenários			
	1	2	3	4
Redução na emissão (ppm)	2,39E-07	4,77E-07	7,16E-07	9,54E-07
ΔT (°C) Garopaba	-9,5E-10	-1,9E-09	-2,9E-09	-3,8E-09
ΔT (°C) Mundial	-0,00026	-0,00052	-0,00078	-0,00104

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise dos resultados mostra que os cenários estudados indicam uma redução progressiva nas concentrações de gases de efeito estufa (GEE), variando de 2,39E-07 a 9,54E-07 partes por milhão (ppm). Embora esses valores pareçam pequenos, eles representam a diminuição proporcional das emissões em cada um dos cenários analisados.

Quando se observa a variação de temperatura (ΔT) para o município de Garopaba, percebe-se que a mudança estimada é relativamente pequena, variando de -9,5E-10°C a -3,8E-09°C. Quando esses resultados são extrapolados para a escala

global, a variação de temperatura permanece reduzida, oscilando entre $-0,00026^{\circ}\text{C}$ e $-0,00104^{\circ}\text{C}$, dependendo do cenário considerado.

Esses dados revelam que, embora a compostagem ofereça reduções positivas nas emissões de GEE, seu impacto direto na mitigação do aquecimento global é bastante limitado quando considerado isoladamente, especialmente em uma escala local. As variações de temperatura resultantes são baixas, tanto em Garopaba quanto globalmente. Isso sugere que, apesar de as práticas locais de compostagem contribuírem para a redução das emissões, elas precisam ser parte de um esforço mais amplo e coordenado para alcançar um impacto significativo no aquecimento global.

Luiz (2022) aplicou a metodologia de Ellis (2013) ao analisar as emissões de gases de efeito estufa dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis, a partir da proposição de cenários de valorização de resíduos e estimou uma redução da temperatura global de cerca de $0,94^{\circ}\text{C}$ ao longo de 100 anos. No entanto, Luiz (2022) considerou o conjunto total de resíduos, não se limitando apenas aos resíduos orgânicos e à compostagem. Isso corrobora a ideia de que a gestão de resíduos precisa integrar um esforço mais amplo e coordenado para gerar um impacto significativo no aquecimento global.

Conforme Raju (2020), a implementação global da compostagem poderia reduzir as emissões de GEE em 2,3 bilhões de toneladas nos próximos 30 anos. A redução do desperdício de alimentos é uma das ações mais importantes para reverter o aquecimento global.

Diversos estudos abordam a redução das emissões de GEE no âmbito da compostagem, o que pode potencializar sua contribuição para a mitigação do aquecimento global. Walling et al. (2020) discutem a modelagem matemática para prever e otimizar o processo de compostagem, enquanto Yin et al. (2021) exploram o uso de biochar como uma estratégia eficiente para reduzir as emissões durante o processo. Além disso, Sandelowsky (2021) propõe que a compostagem seja integrada a programas de captura de carbono, visando maximizar sua eficácia. Saini e Bhatt (2020), por sua vez, discutem várias estratégias agrícolas sustentáveis, destacando a compostagem como uma solução viável para mitigar as emissões de GEE no setor agrícola.

Esses estudos convergem na importância de ajustar os parâmetros operacionais para otimizar a compostagem e outras práticas agrícolas, com o objetivo

de minimizar as emissões de gases de efeito estufa. Enquanto Walling et al. (2020) e Yin et al. (2021) se concentram nos aspectos técnicos e na modelagem do processo, Sandelowsky (2021) e Saini e Bhatt (2020) abordam as estratégias práticas de implementação e os benefícios econômicos e ambientais dessas práticas.

Em suma, as emissões de GEE provenientes da compostagem, quando mitigadas, têm um efeito modesto na redução da temperatura, tanto local quanto globalmente. No entanto, é fundamental reconhecer que cada pequena contribuição é valiosa no contexto dos esforços globais de mitigação. Isso reforça a importância de ações integradas e coordenadas para que as reduções de GEE em escala global atinjam níveis significativos, capazes de influenciar de maneira mais perceptível as mudanças climáticas e, conseqüentemente, o aquecimento global. Além disso, a gestão eficaz de resíduos sólidos urbanos está intimamente ligada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), abrangendo questões de justiça social e ambiental global. A implementação de políticas inclusivas de gestão de resíduos e a promoção de práticas como a compostagem podem contribuir para diversos ODS, como a erradicação da pobreza, a segurança alimentar, a saúde pública e o combate às mudanças climáticas, conforme evidenciado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2024).

Existe uma inter-relação significativa entre gestão de resíduos, poluição ambiental, aquecimento global e mudança climática. O processamento e reaproveitamento de resíduos, incluindo a compostagem e a produção de composto orgânico para utilização na agricultura, são exemplos de práticas que não apenas mitigam esses problemas, mas também podem gerar riqueza e empregos essenciais, especialmente para países em desenvolvimento (Raju, 2020).

5 PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S)

Com base na pesquisa realizada e nos resultados obtidos, foram desenvolvidas três atividades: aulas ministradas para a turma de Gestão Ambiental do campus IFSC Garopaba, por meio de um estágio de docência; submissão de um artigo científico para publicação; e elaboração de um relatório técnico para a Prefeitura Municipal de Garopaba. Essas atividades estão detalhadas nos subitens a seguir.

5.1 ESTÁGIO DOCÊNCIA - AULAS PARA A TURMA DE GESTÃO AMBIENTAL DO CAMPUS IFSC GAROPABA

Durante o estágio docência, foram ministradas aulas para a turma de Gestão Ambiental do campus IFSC Garopaba, como parte das atividades do Mestrado Profissional em Clima e Ambiente. As aulas foram estruturadas em duas disciplinas: Gestão de Resíduos Sólidos e Tratamento de Águas e Efluentes, totalizando 15 horas de atividades, com 7,5 horas dedicadas a cada disciplina. Essas aulas abordaram temas diretamente relacionados à pesquisa de mestrado, que investiga a gestão de resíduos sólidos, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e as mudanças climáticas. Os planos das aulas ministradas constam no Anexo I deste trabalho, onde são detalhados os objetivos, conteúdos, metodologias, recursos didáticos, avaliações da aprendizagem, e referências bibliográficas utilizadas.

Na disciplina de Gestão de Resíduos Sólidos, o conteúdo foi centrado na caracterização dos resíduos e sua aplicação na gestão ambiental. A abordagem envolveu tanto aspectos teóricos quanto práticos. Os alunos foram introduzidos às características físicas, químicas e biológicas dos resíduos sólidos, com destaque para a metodologia de composição gravimétrica, que foi explorada em atividades práticas no campus. Esta metodologia é fundamental para a identificação dos componentes dos resíduos e para a interpretação dos resultados obtidos, que podem ser diretamente relacionados à gestão adequada dos resíduos e à minimização das emissões de GEE. A compreensão da composição dos resíduos é essencial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação das mudanças climáticas, uma vez que

a gestão inadequada desses resíduos pode resultar em emissões significativas de metano, um dos principais gases de efeito estufa.

Na disciplina de Tratamento de Águas e Efluentes, o foco foi direcionado para a compreensão das mudanças climáticas e dos projetos de créditos de carbono no contexto do tratamento de resíduos. As aulas exploraram a introdução ao mercado de carbono, incluindo definições e conceitos, além da evolução das discussões climáticas globais. A análise de casos reais e o debate sobre a viabilidade dos projetos de créditos de carbono permitiram uma compreensão mais aprofundada dos desafios e oportunidades envolvidos na implementação dessas iniciativas. Esses tópicos são intrinsecamente ligados à pesquisa em desenvolvimento, que busca avaliar como práticas de gestão de resíduos sólidos podem influenciar as emissões de GEE e, consequentemente, contribuir para as mudanças climáticas.

As atividades pedagógicas, que incluíram aulas expositivas, práticas no campus e debates interativos, foram planejadas de forma a não apenas transmitir o conhecimento técnico, mas também a estimular a reflexão crítica dos alunos sobre a relação entre a gestão de resíduos sólidos e as mudanças climáticas. Dessa forma, as aulas ministradas podem ter contribuído significativamente para a formação dos alunos, ao mesmo tempo em que reforçaram e aprofundaram os temas centrais da pesquisa de mestrado.

5.2 SUBMISSÃO DE ARTIGO CIENTÍFICO PARA PUBLICAÇÃO

O artigo científico elaborado foi submetido para publicação em 18 de outubro de 2024:

- Ciência e Natura – Título: “EMISSIONES DE GASES DE EFECTO ESTUFA PROVENIENTES DE COMPOSTAGEM E ATERRAMIENTO DE RESIDUOS ORGANICOS E SUA INFLUENCIA NO AQUECIMIENTO GLOBAL”.

5.3 RELATÓRIO TÉCNICO PARA A PREFEITURA MUNICIPAL DE GAROPABA

Um relatório técnico foi desenvolvido e entregue à Prefeitura Municipal de Garopaba com o objetivo de apresentar os resultados obtidos na pesquisa realizada no município. O relatório técnico consta no Anexo II deste trabalho. Este documento visa fornecer subsídios para a tomada de decisões estratégicas e a implementação de políticas públicas voltadas para a gestão de resíduos sólidos e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para o enfrentamento das mudanças climáticas na região.

O relatório aborda a caracterização dos resíduos sólidos gerados no município, destacando sua composição gravimétrica e as implicações para a gestão ambiental local. São discutidos os impactos potenciais das práticas atuais de gestão de resíduos na emissão de GEE, com ênfase na importância de adotar estratégias que minimizem essas emissões, como a compostagem. Além disso, o documento apresenta recomendações para a melhoria da infraestrutura e das práticas de gestão de resíduos, visando reduzir os impactos ambientais e alinhar as ações do município com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Por fim, o relatório destaca a relevância de integrar a gestão de resíduos sólidos ao planejamento municipal de ações climáticas, reforçando o papel do município de Garopaba na mitigação das mudanças climáticas através de práticas de gestão sustentável.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação, foi analisado o impacto das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da compostagem sobre o aquecimento global, com foco específico no município de Garopaba. O estudo teve como objetivo quantificar e analisar as emissões de GEE associadas à compostagem e avaliar sua contribuição para o aquecimento global. Foram propostos cenários alternativos para o gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos, visando incrementar a quantidade de resíduos destinados à compostagem no município. Além disso, foi determinado um fator de emissão específico para a leira de compostagem estudada, o que possibilitou a comparação com o fator de emissão padrão do IPCC, amplamente utilizado em inventários de emissões.

Os resultados indicaram que a compostagem, em comparação ao aterro sanitário, reduz significativamente as emissões de GEE, corroborando com a literatura existente. Além disso, a utilização de fatores de emissão calculados para condições locais, como o desenvolvido neste estudo, pode fornecer estimativas mais precisas das emissões de GEE. O fator de emissão calculado resultou em uma estimativa de emissões 137,5% menor do que o fator padrão do IPCC, sugerindo que o uso de valores genéricos pode superestimar as emissões em contextos específicos. Especificamente, as emissões calculadas utilizando o fator padrão foram aproximadamente 2,4 vezes maiores do que as emissões estimadas com o fator específico determinado neste estudo.

Quanto às contribuições da compostagem no aquecimento global, os resultados são positivos, embora modestos. Apesar da compostagem oferecer reduções significativas nas emissões de GEE, seu impacto direto na mitigação do aquecimento global é limitado quando considerado isoladamente, especialmente em uma escala local. As variações de temperatura resultantes são mínimas, tanto em Garopaba quanto globalmente. Isso sugere que, embora as práticas locais de compostagem contribuam para a redução das emissões, elas precisam ser parte de um esforço mais amplo e coordenado para alcançar um impacto significativo no combate ao aquecimento global.

É importante destacar que este estudo se concentrou em estimar a contribuição da compostagem na redução da temperatura e do aquecimento global. No entanto,

essa estimativa foi baseada em dados específicos do município de Garopaba, onde a fração de resíduos orgânicos representa aproximadamente 35% do total de resíduos gerados. Esse percentual é inferior à média tanto do Brasil quanto mundial, onde os resíduos orgânicos geralmente compõem cerca de 50% do total de resíduos gerados. Essa diferença pode influenciar os resultados e, portanto, é necessário considerar que as conclusões deste estudo podem variar em contextos em que a proporção de resíduos orgânicos seja maior. Dessa forma, estudos futuros poderiam explorar essas variações para avaliar o impacto da compostagem em diferentes realidades regionais e globais.

Os objetivos propostos foram plenamente alcançados. A pesquisa permitiu a quantificação e comparação das emissões de GEE em diferentes cenários, evidenciando a importância da escolha de métodos e fatores de emissão adequados para cada contexto específico.

Em termos de recomendações, sugere-se que estudos futuros considerem a variabilidade dos fatores de emissão em diferentes condições climáticas e operacionais, visando otimizar ainda mais a precisão das estimativas de emissões. Além disso, a expansão da análise para outros municípios e a inclusão de outras práticas de gestão de resíduos orgânicos podem contribuir para um entendimento mais abrangente do impacto ambiental dessas práticas.

Por fim, recomenda-se que políticas públicas e estratégias de gestão de resíduos sólidos considerem a compostagem como uma ferramenta eficaz de mitigação de emissões, promovendo a adoção de práticas que maximizem os benefícios ambientais dessa técnica.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: Abrelpe, 2022.

ABREU, Marcos José de. **Gestão comunitária de resíduos orgânicos: o caso do Projeto Revolução dos Baldinhos (PRB), Capital Social e Agricultura Urbana**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. Disponível em: <<https://mobile.repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107404>>. Acesso em: 10 Out. 2023.

AMLINGER, Florian; PEYR, Stefan; CUHLS, Carsten. Greenhouse gas emissions from composting and mechanical biological treatment. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 47-60, 2008. SAGE Publications. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1177/0734242x07088432>>.

ANDERSON, Thomas R.; HAWKINS, Ed; JONES, Philip D. CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of arrhenius and callendar to today's earth system models. **Endeavour**, [S.L.], v. 40, n. 3, p. 178-187, 2016. Elsevier BV. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>>. Acesso em: 28 mar. 2024.

BECK-FRIIS, B.; PELL, M.; SONESSON, U.; JÖNSSON, H.; KIRCHMANN, H. Formation and Emission of N₂O and CH₄ from Compost Heaps of Organic Household Waster. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 62, n. 3, p. 317-331, 2000. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1006245227491>.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília, 2009.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 481, de 3 de outubro de 2017. **Estabelece Critérios e Procedimentos Para Garantir O Controle e A Qualidade Ambiental do Processo de Compostagem de Resíduos Orgânicos, e dá Outras Providências**. Brasília, 2017a.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: manual de orientação**. Brasília: MMA, 2017b.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Roteiro para Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU**. Brasília: Protegeer, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer/07.RoteiroparaReducaodasEmissoesdeGasesdeEfeitoEstufaGEEeNoManejodeRSU.pdf>>.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MMA, 2022a. Disponível em: <<https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>>

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Brasília: MCTI, 2022b. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>>.

CONFOR. OPTIMA – MANUAL DO USUÁRIO – Versão 1.0/2022. Testes de Performance, Eficiência, Controle da Combustão e Monitoramento de Emissões Poluentes. 2022.

DIAZ, L.F.; SAVAGE, G.M.; EGGERTH, L.L.; CHIUMENTI, A. Chapter 5: Systems used in composting. **Compost Science and Technology**, [S.L.], p. 67-87, 2007. Elsevier. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s1478-7482\(07\)80008-x](http://dx.doi.org/10.1016/s1478-7482(07)80008-x)>.

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

EPSTEIN, Eliot. **The science of composting**. Lancaster: Technomic Publishing, 1997.

FAPESC. FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DE SANTA CATARINA. **Boletim Técnico: Critérios técnicos para elaboração de projeto, operação e monitoramento de pátios de compostagem de pequeno porte**. Florianópolis, 2017. Disponível em: <<https://cepagro.org.br/wp-content/uploads/2023/05/Boletim-Tecnico-Compostagem.pdf>> Acesso em: 08 abr. 2024.

FIRMO, Alessandra Lee Barbosa; MOREIRA, Hélinah Cardoso; JUCÁ, José Fernando Thomé; LUCENA, Luciana de Figueirêdo Lopes; MARIANO, Maria Odete Holanda; RUSSO, Mário Augusto Tavares; SCHMIDT, Thilo. **Gestão de resíduos sólidos urbanos com baixas emissões de GEE**. Caderno Temático, v. 2. Brasília: Ministério de Desenvolvimento Regional, PLANSAB, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/plano-nacional-de-saneamento-basico->

plansab/arquivos/2CadernotematicoGestaodeRSUcombaixasemissoesdeGEE.pdf>
Acesso em: 01 abr. 2024.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Ferramenta de cálculo de emissões de GEE**. São Paulo: FGV, 2024. Disponível em: <<https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>>

GAROPABA. PLANEJAMENTO TERRITORIAL E MEIO AMBIENTE. **Estudo Técnico Socioambiental**. Garopaba: Fundação Unisul, 2022.

GAROPABA. PREFEITURA MUNICIPAL DE GAROPABA. **Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico: Produto II – Relatório do diagnóstico técnico-participativo**. Garopaba: Motta Martins Engenharia Ltda, 2023.

GICHAMO, T.; GÖKÇEKUŞ, H. Interrelation between climate change and solid waste. **J. Environ. Pollut. Control**, v. 2, n. 1, p. 104, 2019.

GOMES, J. da C. . Formação de multiplicadores para reciclagem de resíduos orgânicos por meio da compostagem em tempos de pandemia. **Revista ELO – Diálogos em Extensão**, [S. l.], v. 10, 2021. DOI: 10.21284/elo.v9i.11875. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/elo/article/view/11875>.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. 2022. Disponível em:
<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/garopaba/panorama>>

INÁCIO, Caio de Teves; MILLER, Paul Richard Momsen. **Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

INÁCIO, Caio de Teves; BETTIO, Daniel Beltrão; MILLER, Paul Richard Momsen. **O papel da compostagem de resíduos orgânicos urbanos na mitigação de emissão de metano**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. Disponível em:
<<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/35983/1/documentos-127.pdf>>.

INÁCIO, Caio de Teves. **Dinâmica de Gases e Emissões de Metano em Leiras de Compostagem**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Eventos Extremos de Outubro de 2023 no Brasil**. Brasília: INMET, 2023. Disponível em:
<https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Nota_EventosExtremos_Brasil_Outubro2023-vale-este.pdf#page=6&zoom=auto,-100,372>

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. IPCC, 2013. Disponível em:
<<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>>.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. IPCC, 2019.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. IPCC, 2021. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>>. Acesso em: 30 Mar. 2024.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **AR6 Climate Change 2023: Synthesis Report**. IPCC, 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Acesso em: 30 Mar. 2024.

JÄCKEL, Udo; THUMMES, Kathrin; KÄMPFER, Peter. Thermophilic methane production and oxidation in compost. **Fems Microbiology Ecology**, [S.L.], v. 52, n. 2, p. 175-184, abr. 2005. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1016/j.femsec.2004.11.003>.

JIANG, Tao; SCHUCHARDT, Frank; LI, Guoxue; GUO, Rui; ZHAO, Yuanqiu. Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. **Journal Of Environmental Sciences**, [S.L.], v. 23, n. 10, p. 1754-1760, out. 2011. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1001-0742\(10\)60591-8](http://dx.doi.org/10.1016/s1001-0742(10)60591-8).

LACERDA, Francis; NOBRE, Paulo. AQUECIMENTO GLOBAL: conceituação e repercussões sobre o brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 14-17, 2010. Revista Brasileira de Geografia Física. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v3i1.232653>>. Acesso em: 10 Mar. 2024.

LIMA JUNIOR, Roberto Guião de Souza; MAHLER, Claudio Fernando; DIAS, Albiane Carvalho; LUZ JUNIOR, Willker Figueirêdo da. Avaliação de novas práticas de compostagem em pequena escala com aproveitamento energético. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 361-370, 19 jan. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016159687>.

LOU, X.F.; NAIR, J. The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – A review. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 100, n. 16, p. 3792-3798, 2009. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.006>>.

LUIZ, Bruno Vieira. **Análise de emissões de gases de efeito estufa dos resíduos sólidos urbanos do município de Florianópolis a partir da proposição de cenários de valorização de resíduos**. 2022. Dissertação de Mestrado, Curso de Clima e Ambiente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

LUZ, Fernanda Giffoni Fernandes. **Avaliação de estratégias de cooperação para a gestão de resíduos sólidos urbanos nos municípios com sede na bacia hidrográfica do rio Corumbataí**. 2019. Tese de Doutorado, Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.

MANCINI, Eliana; NEGRO, Viviana; MAINERO, Davide; RAGGI, Andrea. The use of a simplified carbon footprint tool for organic waste managers: pros and cons. **Sustainability**, v. 14, n. 4, p. 1951, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14041951>

NAIME, Roberto. Diagnóstico Ambiental e Sistemas de Gestão Ambiental. Novo Hamburgo: Feevale, 2005.

NORDAHL, Sarah L.; DEVKOTA, Jay P.; AMIREBRAHIMI, Jahon; SMITH, Sarah Josephine; BREUNIG, Hanna M.; PREBLE, Chelsea V.; SATCHWELL, Andrew J.; JIN, Ling; BROWN, Nancy J.; KIRCHSTETTER, Thomas W. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions and Human Health Trade-Offs of Organic Waste Management Strategies. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 54, n. 15, p. 9200-9209, 2020. American Chemical Society (ACS). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c00364>>.

NORDAHL, Sarah L.; PREBLE, Chelsea V.; KIRCHSTETTER, Thomas W.; SCOWN, Corinne D. Greenhouse gas and air pollutant emissions from composting. **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 6, p. 2235-2247, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05846>>.

ORTIZ, Ana Carolina Tomaz Duarte Tobaruela; GUIMARÃES, Ednaldo Carvalho. ANÁLISE DE CLUSTER APLICADA ÀS EMISSÕES DE CO₂ NO BRASIL. **Geografia**, [S.L.], v. 47, n. 1, p. 1-23, 8 nov. 2022. UNESP - Universidade Estadual Paulista. <http://dx.doi.org/10.5016/geografia.v47i1.16714>.

OTENG-ABABIO, Martin; ANNEPU, Ranjith; BOURTSALAS, A. C. 'Thanos'; INTHARATHIRAT, Rotchana; CHAROENKIT, Sasima; KENNARD, Nicole. Urban Solid Waste Management. **Climate Change and Cities**, [S.L.], p. 553-582, 2018. Cambridge University Press. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1017/9781316563878.022>>.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P. da; MASSIGNAM, A. M., PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002.

RAJU, Reddy. Waste Management, Environmental Pollution, Global Warming and Climate Change. **International Journal of Scientific and Technical Research in Engineering** (IJSTRE), v. 5, n. 1, p. 1-10, 2020.

SAINI, Jhanvi; BHATT, Rajan. Global Warming - Causes, Impacts and Mitigation Strategies in Agriculture. **Current Journal Of Applied Science And Technology**, [S.L.], p. 93-107, 29 abr. 2020. Sciencedomain International. <http://dx.doi.org/10.9734/cjast/2020/v39i730580>.

SANDELOWSKY, Aaron. **Carbon Capture Program through Composting**. 2021.

SANTA CATARINA. SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina**. Florianópolis: SDS, 2018.

SANTOS, Carlos Felipe Catorza da Silva. **Compostagem como redutor de gases do efeito estufa, uma alternativa à disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários**. 2020. 106 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

SÁNCHEZ, Antoni; ARTOLA, Adriana; FONT, Xavier; GEA, Teresa; BARRENA, Raquel; GABRIEL, David; SÁNCHEZ-MONEDERO, Miguel Ángel; ROIG, Asunción; CAYUELA, María Luz; MONDINI, Claudio. Greenhouse gas emissions from organic waste composting. **Environmental Chemistry Letters**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 223-238, 26 maio 2015. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>.

SAYARA, Tahseen; SÁNCHEZ, Antoni. Gaseous emissions from the composting process: controlling parameters and strategies of mitigation. **Processes**, v. 9, n. 10, p. 1844, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr9101844>.

SEEG. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2022**. Observatório do Clima, 2023. Disponível em: <<https://seeg.obass.info/relatorios/>> Acesso em: 24. Mar. 2024.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Resíduos Sólidos - Série Histórica**. Brasil, 2022. Disponível em:
 <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acesso em: 15. Mar. 2024.

TEODORO, Mauro Sergio. **Confecção de Compostos Orgânicos em Parnaíba, PI**. Parnaíba: Embrapa, 2016. Disponível em:
 <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1055970/1/Comunicado238.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2024.>

TRENBERTH, Kevin E.; SMITH, Lesley. The Mass of the Atmosphere: a constraint on global analyses. **Journal Of Climate**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 864-875, 15 mar. 2005. American Meteorological Society. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/jcli-3299.1>>

UNEP. United Nations Environment Programme. **Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource**. Nairobi, 2024. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/44939>>

UNFCCC. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Methodological tool: Project and leakage emissions from composting**. Version 02.0. 2017. Disponível em:
 <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-13-v2.pdf>>.

VERAS, Roani Simões. **Compostagem de resíduos de alimentos e podas trituradas de árvores em leiras estáticas como mecanismo de redução de GEE**. 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

QUINTÃO, José Maurício B.; CANTINHO, Roberta Zecchini; ALBUQUERQUE, Eliza Rosário Gomes Marinho de; MARACAHIPES, Leandro; BUSTAMANTE, Mercedes M.C. Mudanças do uso e cobertura da terra no Brasil, emissões de GEE e políticas em curso. **Ciência e Cultura**, [S.L.], v. 73, n. 1, p. 18-24, jan. 2021. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602021000100004>>

WALLING, Eric; TRÉMIER, Anne; VANEECKHAUTE, Céline. A review of mathematical models for composting. **Waste Management**, [S.L.], v. 113, p. 379-394, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.018>.

YIN, Yanan; YANG, Chao; LI, Mengtong; ZHENG, Yucong; GE, Chengjun; GU, Jie; LI, Haichao; DUAN, Manli; WANG, Xiaochang; CHEN, Rong. Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: a review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 798, p. 149294, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149294>.

ZAGO, Valéria Cristina Palmeira; BARROS, Raphael Tobias de Vasconcelos. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 219-228, abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019181376>.

ZHANG, Hongyu; LI, Chunping; LI, Guoxue; ZANG, Bing; YANG, Qingyuan. Effect of Spent Air Reusing (SAR) on Maturity and Greenhouse Gas Emissions during Municipal Solid Waste (MSW) Composting-with Different Pile Height. **Procedia Environmental Sciences**, [S.L.], v. 16, p. 59-69, 2012. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.009>>.

ANEXO I – PRODUTO I: PLANOS DE AULA ESTÁGIO DOCÊNCIA**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE****Glenda Fauth – Matrícula nº 202215000042****Estágio Docência****Gestão de Resíduos Sólidos****Roteiro de Aula****Dados****Formação:** Curso Superior Tecnológico em Gestão Ambiental**Nível de formação:** Graduação**Disciplina:** Gestão de Resíduos Sólidos**Carga horária total:** 7,5 horas**Carga horária em aula:** 4 horas**Carga horária de preparação de aulas:** 3,5 horas**Objetivos****Objetivo Geral**

Compreender a importância da caracterização de resíduos sólidos e sua aplicação na gestão ambiental.

Objetivos Específicos

- Conhecer os tipos de resíduos sólidos.
- Conhecer as regulamentações e normas relacionadas aos resíduos sólidos.
- Entender como a caracterização de resíduos é realizada.
- Aplicar a metodologia de composição gravimétrica.
- Identificar os principais componentes dos resíduos.
- Interpretar os resultados da composição gravimétrica.
- Relacionar os resultados com a gestão de resíduos.

Conteúdos

• Características físicas dos resíduos sólidos. • Características químicas dos resíduos sólidos. • Características biológicas dos resíduos sólidos. • Composição gravimétrica (metodologia).

Metodologia

Tempo	
02h	Aula Teórica com apresentação de slides – Caracterização dos Resíduos Sólidos.
02 h	Aula prática – Metodologia de Composição Gravimétrica.

Recursos didáticos

• Aula Expositiva Dialogada. • Exposição de documentos oficiais. • Aula Prática no Campus IFSC Garopaba.

Avaliação da aprendizagem

Foram considerados a participação em aula e a desenvoltura nas atividades práticas.

Bibliografia

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

Alkmin, D. V., & Junior, L. U. (2017). DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) DO LIXÃO DO MUNICÍPIO DE MARIA DA FÉ, ESTADO DE MINAS GERAIS. **Caminhos de Geografia**, 18(61), 65–82. <https://doi.org/10.14393/rcg186105>

Lima Caetano, R., Leal, S., Da, J., Gonçalves, S., De, M., & Alves Da Silva, N. (n.d.). FERRAMENTA PARA APOIO NO GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS PRODUZIDOS NA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS (UFAM). Retrieved September 11, 2020, from <http://www.unesco.org/>

COMCAP. (2002). **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE FLORIANÓPOLIS Relatório Final ii**. Disponível em http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/04_12_2009_16.43.20.3c8dbbc3ec4faf520fb12678faea9be3.pdf.

Galdino, S. D. J., & Martins, C. H. (2015). COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA COLETA CONVENCIONAL DE UM MUNICÍPIO DE PEQUENO PORTE. **Tecno-Lógica**, 20(1), 01. <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v20i1.6060>

GAROPABA. PREFEITURA MUNICIPAL DE GAROPABA. **Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico: Produto II – Relatório do diagnóstico técnico-participativo**. Garopaba: Motta Martins Engenharia Ltda, 2023.

Monteiro J.H.P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 200 p. 2001. Disponível em http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/manual_girs.pdf

SENAR. **Programa Olericultura Orgânica: Compostagem**. Impressão SENAR-AR/SP. São Paulo, 2006. 48p



INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
MESTRADO PROFISSIONAL EM CLIMA E AMBIENTE

Glenda Fauth – Matrícula nº 202215000042

Estágio Docência

Tratamento de Águas e Efluentes

Roteiro de Aula

Dados

Formação: Curso Superior Tecnológico em Gestão Ambiental Nível de formação: Graduação Disciplina: Tratamento de Águas e Efluentes Carga horária total: 7,5 horas Carga horária em aula: 4 horas Carga horária de preparação de aulas: 3,5 horas

Objetivos

Objetivo Geral Compreender o conceito de Mudanças Climáticas e Projetos de Créditos de Carbono, bem como as áreas de atuação para gestores ambientais no mercado de carbono. Objetivos Específicos • Compreender o conceito de Projetos e Créditos de Carbono. • Explorar projetos de Créditos de Carbono relacionados ao tratamento de resíduos. • Analisar os benefícios ambientais e econômicos de Projetos de Crédito de Carbono. • Promover o debate e a discussão sobre a viabilidade e os desafios de implementar projetos de Créditos de Carbono. • Incentivar a criatividade e a busca por soluções sustentáveis.

Conteúdos

• Introdução ao Mercado de Carbono - Definição e conceitos básicos. • Histórico da Agenda do Clima - Evolução das discussões e ações relacionadas ao clima. • Aumento de Gases de Efeito Estufa na Atmosfera - Principais gases e sua contribuição para o aquecimento global. • Mudanças Climáticas - Causas e consequências das mudanças climáticas. • Mercados de Carbono - Tipos de mercado, Standards e Metodologias. • Processo de Elaboração de um Projeto de Carbono - estudo de viabilidade, elaboração de documentos, auditoria, registro e monitoramento. • Exemplos de Projetos de Carbono. • Inventários de Emissões e Gestão de Carbono. • Exercícios práticos e discussões sobre as áreas de atuação para gestores ambientais no mercado de carbono.

Metodologia

Tempo	
02h	Aula Teórica com apresentação de slides – Introdução ao Mercado de Carbono e aplicação na área de formação em gestão ambiental.
02 h	Exposição prática de experiência – Jogo Interativo, conversa e debate sobre projetos de Créditos de Carbono, com foco em projetos voltados aos Tratamento de Resíduos.

Recursos didáticos

• Aula Expositiva Dialogada. • Jogo interativo

Avaliação da aprendizagem

Foram considerados a participação em aula e a participação no jogo interativo.

Bibliografia

- CDM EXECUTIVE BOARD. CDM Methodology Booklet. UNFCCC, 2021. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/index.html>.
- FIELD, C. B.; BARROS, V. R. (Eds.). Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Global and Sectoral Aspects. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- GHG PROTOCOL. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard (Revised Edition). Washington, DC: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2004.
- GOLD STANDARD FOUNDATION. Gold Standard for the Global Goals: Principles and Requirements. 2020. Disponível em: <https://www.goldstandard.org/>.
- IPCC. 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. Geneva: IPCC, 2014.
- IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- KOLLMUSS, A.; ZINK, H.; POLYCARP, C. Making Sense of the Voluntary Carbon Market: A Comparison of Carbon Offset Standards. Berlin: WWF Germany, 2008.
- KOSSOY, A.; AMBROSI, P. State and Trends of the Carbon Market 2010. Washington, DC: World Bank, 2010.
- NASA. Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/>.
- PEARSON, B.; MEYER, M. The Clean Development Mechanism: A User's Guide. Drayton Valley: Pembina Institute, 2002.
- STERN, N. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- VERRA. Verified Carbon Standard Program Guide. 2021. Disponível em: <https://verra.org/project/vcs-program/>.



ANEXO II – RELATÓRIO TÉCNICO ENTREGUE À PREFEITURA MUNICIPAL DE GAROPABA

Relatório Técnico para a Prefeitura Municipal de Garopaba: Compostagem de Resíduos Orgânicos e Redução de Gases de Efeito Estufa

1. Introdução

O gerenciamento inadequado de resíduos sólidos orgânicos, quando depositados em aterros sanitários, gera emissões significativas de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o metano (CH₄), que é 28 vezes mais potente que o dióxido de carbono (CO₂) no aquecimento global. Com base nisso, este relatório técnico apresenta os resultados de um estudo sobre a compostagem como alternativa ao aterro sanitário, focando no município de Garopaba. A compostagem é uma prática sustentável que pode reduzir as emissões de GEE e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

2. Objetivos

O objetivo deste relatório é fornecer à Prefeitura de Garopaba uma análise técnica do impacto da compostagem na redução de GEE provenientes de resíduos orgânicos, com ênfase em:

- Determinar a quantidade de resíduos orgânicos gerados anualmente no município.
 - Estimar as emissões de GEE provenientes do aterro sanitário e da compostagem.
 - Avaliar o impacto potencial da compostagem na redução das emissões e no aquecimento global.
-

3. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos em Garopaba

Entre 2017 e 2022, o município de Garopaba registrou um aumento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). A tabela a seguir apresenta as quantidades coletadas, destacando a fração orgânica dos resíduos:

Tabela 1: Quantidade de Resíduos por Fração (2017-2022)

Ano	Recicláveis (t)	Orgânicos (t)	Rejeitos (t)	Total (t)
2017	6.019,71	4.882,83	2.894,65	13.797,19
2018	6.104,13	4.951,30	2.935,24	13.990,67
2019	6.411,96	5.200,99	3.083,27	14.696,22
2020	6.899,71	5.596,63	3.317,81	15.814,15
2021	6.713,56	5.445,63	3.228,29	15.387,48
2022	6.668,41	5.409,01	3.206,58	15.284,00

Fonte: Fauth (2024)

Observa-se que os resíduos orgânicos representam aproximadamente 35% do total de resíduos coletados anualmente.

4. Cenários Propostos para Gestão de Resíduos Orgânicos

Foram simulados quatro cenários para a destinação dos resíduos orgânicos através da Ferramenta GHG Protocol:

- **Cenário Atual (2022):** 100% dos resíduos são enviados ao aterro sanitário.
- **Cenário 1:** 25% dos resíduos orgânicos são destinados à compostagem.
- **Cenário 2:** 50% dos resíduos orgânicos são compostados.
- **Cenário 3:** 75% dos resíduos orgânicos são destinados à compostagem.
- **Cenário 4:** 100% dos resíduos orgânicos são compostados.

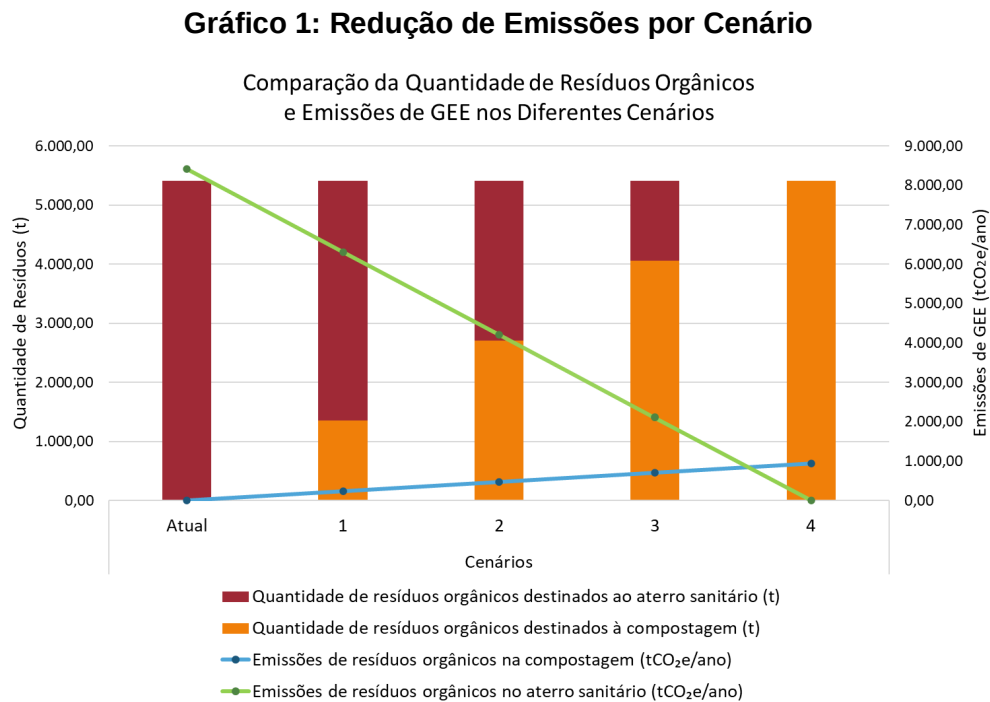
Tabela 2: Quantidade de Resíduos e Emissões de GEE por Cenário

Cenário	Compostagem (t)	Aterro Sanitário (t)	Emissões Totais (tCO ₂ e/ano)
Atual	0,00	5.409,01	8.414,43
Cenário 1	1.352,25	4.056,76	6.548,27
Cenário 2	2.704,50	2.704,50	4.682,12
Cenário 3	4.056,76	1.352,25	2.815,97
Cenário 4	5.409,01	0,00	949,82

Fonte: Fauth (2024).

5. Impacto da Compostagem na Redução das Emissões de GEE

Os resultados mostram que, à medida que mais resíduos orgânicos são desviados para a compostagem, as emissões de GEE são significativamente reduzidas. No **Cenário 4**, onde todos os resíduos são compostados, há uma redução de 88,7% nas emissões totais, em comparação ao cenário atual.



6. Considerações sobre a Viabilidade da Compostagem em Garopaba

Embora a implementação da compostagem ofereça uma redução substancial nas emissões de GEE, sua efetividade depende de uma infraestrutura adequada, investimentos iniciais e adesão da população local. A compostagem, além de reduzir as emissões, também oferece benefícios adicionais, como a produção de composto orgânico para uso agrícola e a diminuição da pressão sobre os aterros sanitários.

7. Conclusão

A implementação gradual de um programa de compostagem para os resíduos orgânicos de Garopaba pode ser uma solução viável e eficaz para reduzir as emissões de GEE e mitigar os impactos locais no aquecimento global. Recomenda-se à Prefeitura:

- Investir na construção de infraestrutura para compostagem.
- Implementar programas de educação ambiental para incentivar a participação da comunidade.
- Realizar monitoramento contínuo das emissões de GEE.

Com essa abordagem, Garopaba pode se posicionar como um município modelo na gestão sustentável de resíduos, contribuindo para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e para a agenda climática global.

8. Referências

Fauth, G. **Análise dos Impactos das Emissões de Gases de Efeito Estufa Provenientes de Compostagem**. Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Santa Catarina. 2024.