



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Carlos Felipe Catorza da Silva Santos

**COMPOSTAGEM COMO REDUTOR DE GASES DE EFEITO
ESTUFA, UMA ALTERNATIVA À DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS
ORGÂNICOS EM ATERROS SANITÁRIOS**

Rio de Janeiro

2020

Carlos Felipe Catorza da Silva Santos

**COMPOSTAGEM COMO REDUTOR DE GASES DE EFEITO ESTUFA,
UMA ALTERNATIVA À DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM
ATERROS SANITÁRIOS**



Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof^a. Dra. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S237 Santos, Carlos Felipe Cartoza da Silva.
Compostagem como redutor de gases de efeito estufa, uma alternativa à disposição de resíduos orgânicos e aterros sanitários / Carlos Felipe Cartoza da Silva Santos. – 2020.
106f.

Orientadora: Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Resíduos orgânicos - Teses. 3. Redução de gases do efeito estufa - Teses. 4. Créditos de carbono - Teses. 5. Aterro sanitário - Teses. I. van Elk, Ana Ghislane Henriques Pereira. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 628.473.3

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Carlos Felipe Catorza da Silva Santos

**COMPOSTAGEM COMO REDUTOR DE GASES DE EFEITO ESTUFA,
UMA ALTERNATIVA À DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM
ATERROS SANITÁRIOS.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Vinicius Masqueti da Conceição
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Geraldo Antônio Reichert
Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre - DMLU

Rio de Janeiro
2020

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha família e amigos, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos familiares, especialmente a minha mãe que me criou e me conduziu à educação junto com meus irmãos.

A minha amada Isis Castilho, pelo amor e apoio nos momentos de dificuldade, e nos próximos desafios que estão por vir em nossa união, muito obrigado.

Aos responsáveis das empresas de compostagem por disponibilizarem o acesso aos dados para realização da pesquisa.

A minha professora orientadora Ana Ghislane, por toda atenção recebida e pelo incentivo no avanço do trabalho.

Aos amigos Luiz H. Soares, Jorge Chastinet, Rafael Caldeira, Jessica, Ana Gabriela, Nicolas, Vivi, Cazuza, Cardoso, Antônio, Zé e tantos outros que tornaram esse momento possível. Em especial agradeço aos amigos Filipe e Johan pelos grandes momentos.

Aos colegas e professores do PEAMB UERJ meus votos de estima e consideração.

(...) Eles querem que alguém
Que vem de onde “nóiz” vem
Seja mais humilde, baixa a cabeça
Nunca revide, finge que esqueceu a coisa toda...
Mandume – Emicida (2016)

RESUMO

CATORZA, C.F. **Compostagem como redutor de gases do efeito estufa, uma alternativa à disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários.** 2020. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

A compostagem consiste na degradação controlada da fração orgânica dos resíduos sólidos na presença de oxigênio. Com o emprego das técnicas de compostagem evita-se o depósito destes resíduos em aterros sanitários ou mesmo que estes sejam vazados em locais inadequados, propícios a decomposição não controlada e geração do gás metano (CH₄) contribuinte para o agravamento do efeito estufa e mudanças climáticas, além de atrair vetores, doenças e degradação ambiental. O presente estudo tem o objetivo de mensurar o potencial de redução de gases do efeito estufa – GEE, ao realizar o levantamento da quantidade de metano evitado quando empregada a compostagem por uma empresa de coleta e tratamento dos resíduos orgânicos de grandes geradores através da rota tecnológica da compostagem. O levantamento foi feito utilizando uma ferramenta de cálculo do MDL que possibilita obtenção de créditos de carbono, considerando como linha de base as emissões do aterro sanitário Santa Rosa, localizado no Rio de Janeiro. Os cálculos foram realizados utilizando os dados de quantidade de resíduos orgânicos compostados pela empresa em função dos fatores de emissão padrão estabelecidos na ferramenta metodológica. Foi encontrada uma redução de 22.062 de toneladas de CO₂eq, o que representa 83% em relação às emissões provenientes do aterro sanitário CTR Seropédica e uma receita de € 358.000,00. Os resultados apontam a compostagem como uma alternativa eficaz para tratamento da parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos com baixo impacto ambiental e menor emissão de GEE.

Palavras-chave: Compostagem; Gases do Efeito Estufa; Metano; Resíduos Orgânicos; Inventário de Gases do Efeito Estufa – GEE; Mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL; Créditos de Carbono.

ABSTRACT

CATORZA, C.F. **Composting as reducer of greenhouse gases, an alternative to disposal of food waste in sanitary landfills.** 2020. 106f. Thesis (Master of Science degree in Environmental Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Composting processes consists of controlled degradation of the organic fraction of solid waste in the presence of oxygen. With the use of composting techniques, the deposit of these residues in sanitary landfills is avoided or even they are emptied in inappropriate places, conducive to uncontrolled decomposition and generation of methane gas (CH₄) contributing to the worsening of the greenhouse effect and climate change, in addition to attracting vectors, diseases and environmental degradation. The present study aims to measure the potential for reducing greenhouse gases - GHG, by surveying the amount of methane avoided when composting by a company that collects and processes waste from large generators using the technological route of composting. The survey was carried out using a CDM calculation tool that makes it possible to obtain carbon credits, considering the baseline as derived from the Santa Rosa landfill, located in Rio de Janeiro. The calculations were performed using data on the amount of waste composed by the company as a function of the emission factors defined in the methodological tool. It was a reduction of 22,062 tons of CO₂eq, which represents 83% in relation to the victims from the CTR Seropédica landfill and a revenue of € 358,000.00. The results show that composting is an effective alternative for treating the organic portion of urban solid waste with low environmental impact and lower GHG emissions.

Keywords: Composting; Greenhouse Gases; Methane; Food Waste; Greenhouse Gas Inventory – GHG; Clean Development Mechanism – CDM; Carbon Credits.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de GWP para os principais GEE e suas principais fontes de emissão.....	24
Tabela 2 - Emissões de GEE provenientes dos resíduos sólidos em diversos países (kgCO ₂ /Habitante).....	29
Tabela 3 - Valores históricos e volume de créditos de carbono negociados....	36
Tabela 4 - Atualização dos projetos de MDL brasileiros.	42
Tabela 5 - Metodologias para projetos MDL aprovadas para gerenciamento de resíduos por tipo de projeto.....	43
Tabela 6 - Comparação entre as características da compostagem e aterros sanitários.....	53
Tabela 7 - Quantidade de resíduos orgânicos compostados na empresa de compostagem.....	60
Tabela 8 - Metodologias MDL aprovadas para compostagem.	62
Tabela 9 - Fatores aplicados à Equação (4).	69
Tabela 10 - Fatores aplicados à Equação (6).....	72
Tabela 11 - Emissões de CH ₄ no cenário de linha de base.	76
Tabela 12 - Emissões de CH ₄ pela compostagem.	78
Tabela 13 - Reduções de Emissões de CH ₄	80
Tabela 14 - Possibilidades de receitas com créditos de carbono.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: O efeito Estufa	21
Figura 2: Hierarquia de Gestão de resíduos x Emissões de GEE.....	26
Figura 3: Relação entre economia circular e redução de gases do efeito estufa.	27
Figura 4: Evolução da emissão de GEE do setor de tratamento de resíduos no Brasil.	29
Figura 5: Evolução da emissão de CH ₄ do setor de tratamento de resíduos no Brasil.	30
Figura 6: Variação do valor do crédito de carbono ICE EUA futuros.....	35
Figura 7: Valores dos créditos de carbono durante a pandemia de COVID-19.	37
Figura 8: Adicionalidade e Linha de Base.	39
Figura 9: Evolução do registro de projetos de MDL no Brasil.	40
Figura 10: Composição dos Gases no ar sobre as leiras de compostagem. ...	50
Figura 11: Contribuição de trabalhos e fontes de informações na pesquisa. ...	56
Figura 12: Localização da empresa de compostagem.	58
Figura 13: Revolvedor mecânico em operação na empresa de compostagem.	59
Figura 14: Fluxo de gerenciamento de resíduos orgânicos e emissões de GEE na linha de base.	66
Figura 15: Fluxo de gerenciamento de resíduos orgânicos e emissões de GEE no cenário do projeto de compostagem.	70
Figura 16: Emissões de CH ₄ no cenário de linha de base.....	77
Figura 17: Reduções de emissões de metano pela compostagem.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AND	Autoridade Nacional Designada
AT	Áustria
BE	Bélgica
BECH ₄ ,manure,y	Emissões da linha de base de esterco compostado pelas atividades do projeto de compostagem
BECH ₄ ,SWDS,y	Emissões de metano evitadas durante o ano y com a prevenção da destinação de resíduos orgânicos para aterros sanitários durante o período a partir do início da atividade do projeto de compostagem até o fim do ano y
BEWW,y	Emissões da linha de base das águas residuais co-compostas no ano y
BEy	Emissões de linha de base no ano y
C	Carbono
CDM	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (<i>em inglês Clean Development Mechanism</i>)
CDM-CPA-DD	Documento de concepção do Projeto de atividades MDL (<i>em inglês Clean Development Mechanism Program Activity Design Document Form</i>)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CIMGC	Comissão Interministerial de Mudanças Globais de Clima
CO ₂	Dióxido de Carbono
COP21	21 ^a Conferência das Partes. A Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças, também chamada de Acordo de Paris.
CPAS	Atividades Programáticas

COP15	15 ^a Conferência das Partes. A Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças, também chamada Conferência de Copenhague.
CTR	Central de Tratamento de Resíduos
CVM	Comissão de Valores Mobiliários
DCP	Documento de Concepção do Projeto
DE	Alemanha
DOC	Fração de Carbono Orgânico
DOC _i	Fração de carbono orgânico degradável (DOC) que pode decompor
DOC _j	Fração de carbono orgânico degradável (por massa) no lixo tipo j;
EB	Executive Bording
EOD	Entidade Operacional Designada
EPA	Agência Americana de Proteção Ambiental
EU	União Europeia
EU ETS	Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia
EUR	Euro
F	Fração de metano capturada no aterro sanitário e queimada em flare, incinerada ou usada de outra maneira.
<i>F</i>	Fração de metano no gás de aterro
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
GEE	Gases do Efeito Estufa
GEE	Gases de efeito estufa
Gg	Giga grama
GHG	Green House Gas
GWP	Potencial de Aquecimento Global (<i>em inglês Global Warming Potential</i>)
GWP _{CH4}	Potencial de Aquecimento Global do metano
H	Hidrogênio
H ₂ O	Fórmula química da água
Hab	Habitante
HFCs	Hidrofluorcarbonos

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatista
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPEA	Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas
kg	Quilograma
kj	Taxa de decaimento do resíduo tipo j
km	Quilômetro
MBRE	Mercado Brasileiro de Redução de Emissões
MCF	Fator de correção de metano
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MD _{y,reg}	Quantidade de metano que teria sido destruído/queimado por obrigações legais durante o ano y na ausência do projeto de compostagem.
MMA	Ministério do Meio Ambiente
N	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NH ₃	Amônia
NL	Holanda
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
°C	Graus Celsius
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organizações das Nações Unidas
OX	Fator de Oxidação
PFCs	Perfluorcarbonos
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNMC	Política Nacional de Mudanças Climáticas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (em inglês UNEP - <i>United Nations Environment Programme</i>)
PoA	Programas de Atividades
PP	Proponente do Projeto
R\$	Real
RCE	Reduções Certificadas de Emissões
REF	Referência
RSU	Resíduos Sólidos urbanos
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
SIRENE	Sistema de Registro Nacional de Emissões
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
t	Toneladas
tCO ₂ eq	Toneladas de dióxido de carbono equivalente
UDC	Unidades Descentralizadas de Compostagem
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (em inglês UNEP - <i>United Nations Environment Programme</i>)
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
UTC	Unidades de Triagem e Compostagem
UV	Ultravioleta
VER	Reduções Voluntárias de Emissões
W _{j,x}	Quantidade de lixo orgânico tipo j despejado no aterro no ano x
Φ	Valor padrão para o fator de correção para contabilizar incertezas do modelo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
OBJETIVOS	20
Objetivo Geral	20
Objetivos Específicos	20
1. REFERENCIAL TEÓRICO	21
1.1. Efeito estufa e mudanças climáticas	21
1.2. Impacto da gestão de resíduos sólidos urbanos sobre as mudanças climáticas	25
1.3. Gestão de emissões de gases do efeito estufa no Brasil	31
1.4. Mercado de Carbono	33
1.5. Projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo no Brasil	38
1.6. Metodologias para projetos de MDL no setor de resíduos	43
1.7. Gestão de resíduos orgânicos no Brasil.	44
1.8. Compostagem	48
1.8.1. Compostagem como mecanismo redutor de Gases do Efeito Estufa – GEE.....	49
1.8.2 Vantagens da utilização da Compostagem	52
2. METODOLOGIA.....	55
2.1. Construção do referencial teórico	55
2.2. Definição do Estudo de Caso	56
2.2.1. Empresa de Compostagem.....	57
2.2.2. Cenário atual para destinação de resíduos sólidos urbanos – CTR Santa Rosa em Seropédica (Linha de Base)	60
2.3. Cálculo das Reduções das Emissões de CH₄ e Créditos de Carbono	61
2.3.1. Metodologia MDL AMS-III.F - Avoidance of methane emissions through composting --- Version 12.0	62
2.3.1.1 Emissões de CH ₄ na CTR Seropédica - Linha de Base.....	65
2.3.1.2. Emissões de CH ₄ com a compostagem – Adicionalidade.....	70

2.3.1.3 Reduções de emissões de CH ₄ e Créditos de Carbono com a compostagem.....	73
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
3.1. Inventários das emissões de CH₄ no CTR Seropédica – Linha de Base	75
3.2 Inventário das emissões de CH₄ com o uso da compostagem	77
3.3. Resultados das reduções das emissões de metano e possibilidades de receitas com créditos de carbono pela compostagem.	79
3.3.1 Reduções de emissões de CH ₄ com a compostagem	79
3.3.2 Possibilidades de receitas com créditos de carbono através da compostagem.....	83
CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E ESTUDOS FUTUROS.....	86
Conclusões.....	86
Limitações e Perspectivas Futuras	88
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICES.....	100

INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos urbanos são resultado do consumo e das atividades humanas, e, quando destinados e/ou tratados de maneira incorreta, podem se tornar um passivo causador de diversos impactos ambientais como degradação e contaminação do solo, corpos hídricos e emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera. Os métodos utilizados para gerenciar e lidar com esses impactos, ou preveni-los, vem sendo objeto de estudos, posto que quantidades consideráveis de resíduos são geradas diariamente (VAN ELK & BOSCOV, 2016).

No Brasil, 50% da massa total de resíduos gerados são resíduos orgânicos passíveis de tratamento biológico com técnicas como: compostagem e digestão anaeróbia (BRASIL, 2019a). De acordo com o relatório apresentado pelo Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2019) são gerados aproximadamente 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, sendo, portanto, 39 milhões de resíduos orgânicos que poderiam ser tratados. O tratamento destes resíduos possui potencial de retorno econômico, a partir da produção e venda de adubo orgânico, energia, combustíveis provenientes da decomposição da matéria orgânica, ou até mesmo através de créditos de carbono (VAN ELK, 2007).

Entretanto, quando os resíduos orgânicos são destinados a aterros sanitários são decompostos sem a presença de oxigênio e assim geram como resultado lixiviado, líquido tóxico e muito prejudicial ao meio ambiente, além de emitir grandes quantidades de metano (CH_4) para a atmosfera, gás altamente poluente e contribui 28 vezes mais para o agravamento do aquecimento global que o gás carbônico (CO_2) (IPCC, 2013; RODRIGUES *et al.*, 2019;).

Com o objetivo de reduzir estes impactos, foi sancionada a Lei 12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS - e regulamentou a gestão de resíduos no Brasil. A política determina ainda que os

aterros sanitários recebam apenas os materiais que não possam ser reaproveitados e/ou reciclados, ou seja, os rejeitos.

Porém, grande parte destes resíduos ainda são destinados de maneira irregular em lixões e aterros sem os devidos dispositivos de controle ambiental, como, recobrimento dos resíduos, sistemas de drenagem de gases e lixiviado (VAN ELK *et al.* 2018). Neste sentido, o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil aponta que no ano de 2018 40,5% dos resíduos coletados no país foram dispostos de maneira inadequada, contribuindo com os impactos ambientais e trazendo danos à saúde humana (ABRELPE, 2019).

Apesar do estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, diversos materiais passíveis de tratamento prévio ou reaproveitamento são descartados em aterros, e conseqüentemente, seu potencial para reaproveitamento é desperdiçado, como o caso dos resíduos sólidos orgânicos (BRASIL, 2019a).

Nesse sentido, uma das soluções para reduzir a massa de resíduos depositados em aterros e minimizar os impactos ambientais da decomposição da matéria orgânica é a adoção de tecnologias de compostagem, pois na presença de oxigênio a emissão de CH₄ durante a decomposição é mínima, gerando CO₂, água e calor ao fim do processo (VERAS, 2018).

De acordo com a Lei 12.305 de 2010, Art.36, item V, a implantação de sistemas de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e a articulação com os agentes econômicos e sociais podem representar formas de utilização do composto produzido, sendo uma alternativa a ser adotada para evitar a disposição destes resíduos em aterros sanitários, além de agregar valor aos resíduos orgânicos (BRASIL, 2010).

Apesar de a PNRS citar a compostagem, e outras técnicas de tratamento de resíduos orgânicos como a biodigestão podem ser usadas tanto pelas prefeituras para tratar os resíduos dos seus municípios, como também por empresas que coletam resíduos orgânicos de grandes geradores (RODRIGUES *et al.*, 2019).

Ao promover tais mudanças, a PNRS acaba por incentivar o mercado de coleta e tratamento de resíduos sólidos orgânicos, até hoje pouco explorado no país, fazendo com que empresas invistam em modelos de negócios sustentáveis e circulares para preencher essa lacuna (RODRIGUES *et al.*, 2019). Isso porque além de instituir a responsabilidade compartilhada, onde os grandes geradores de resíduos são responsáveis pelo correto gerenciamento e destinação dos RSU, a PNRS também impõe que os governos devem articular meios para o sucesso das iniciativas de valorização dos resíduos (BRASIL, 2010).

A relevância do tema advém da necessidade de expansão de modelos de negócios circulares que atendam a demanda do mercado oferecendo tecnologias de tratamento eficazes e ambientalmente adequadas, que possibilitem a valorização dos resíduos orgânicos ao reintroduzir o composto produzido novamente na cadeia produtiva, e assim, contribuindo para o fortalecimento da economia circular no Brasil (FIRMO *et al.*, 2019).

No Rio de Janeiro, uma empresa observou essas possibilidades e investiu em um modelo de negócio sustentável para preencher esta lacuna de mercado, realizando a coleta seguida da compostagem como forma de tratamento e disposição final de resíduos orgânicos de grandes geradores de resíduos no Estado.

Ao realizar esta atividade a empresa acaba por prestar um serviço ambiental para a população do Estado do Rio de Janeiro, isso porque, ao realizar a compostagem, grandes quantidades do gás metano deixam de ser emitidos para a atmosfera, e evita que sejam gerados consideráveis volumes de lixiviado (INÁCIO e MILLER, 2009).

Além do recebimento pelos serviços realizados, a empresa tem como possibilidade de captação financeira a geração e comercialização de créditos de carbono, posto que suas atividades reduzem a geração e emissão do gás metano para a atmosfera (VAN ELK, 2007; UNFCCC, 2016).

A contabilização dos GEE através do processo da compostagem foi realizada aplicando a metodologia MDL AMS.III.F, que consiste em inventariar as reduções das emissões de metano que ocorreriam caso os resíduos orgânicos fossem tratados com compostagem ao invés de depositados

diretamente em aterros sanitários. Como resultado são geradas as Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) ou créditos de carbono, que por sua vez são comercializados nos mercados de carbono (UNFCCC, 2016).

A partir do exposto, o objetivo desse trabalho foi mensurar o potencial de redução de emissão de gases do efeito estufa - GEE ao optar pela técnica de compostagem como alternativa à disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Mensurar o potencial de redução de emissão de gases do efeito estufa – GEE - ao optar pela técnica de compostagem como alternativa à disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários.

Objetivos Específicos

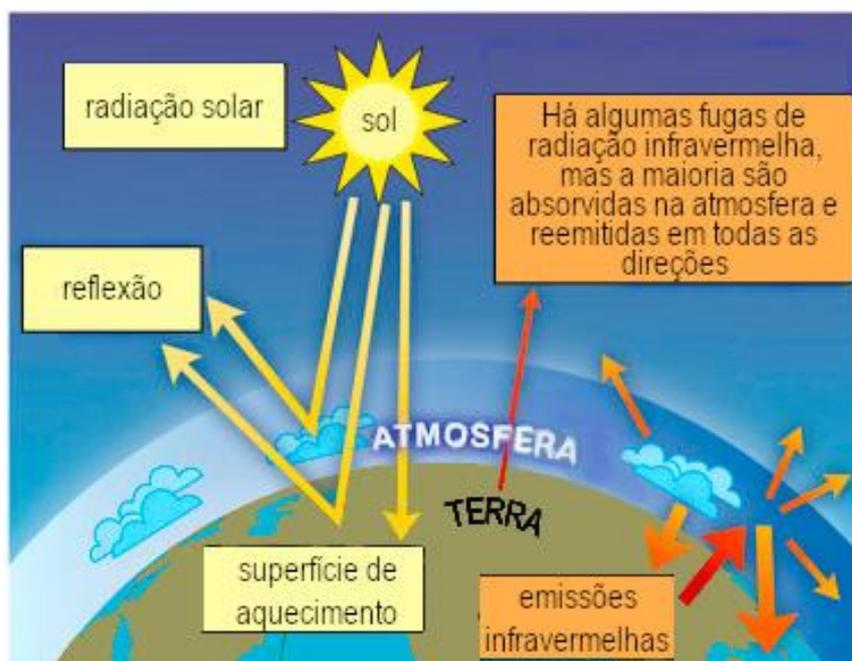
- Calcular a linha de base das Emissões de CH₄ no aterro sanitário CTR Santa Rosa em Seropédica-RJ, considerando os resíduos orgânicos compostados na empresa selecionada.
- Calcular a contribuição adicional da compostagem sobre a quantidade de redução de emissões de CH₄, considerando os resíduos orgânicos compostados na empresa selecionada.
- Apresentar as possíveis receitas através dos RCEs com base nos valores históricos dos créditos de carbono.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Efeito estufa e mudanças climáticas

O efeito estufa é o equilíbrio radiativo entre a radiação solar recebida e a absorção da radiação infravermelha reemitida pela atmosfera. A radiação solar passa em grande parte sem obstáculos pela atmosfera, aquecendo a superfície da Terra. Por sua vez, a energia é reemitida como infravermelho, que em grande parte é absorvida pelo CO₂ e vapor de água na atmosfera terrestre, que atua assim como uma cobertura em torno da Terra. Sem esse efeito estufa natural, a temperatura média da superfície despencaria para cerca de -21°C negativos (ANDERSON, HAWKINS & JONES, 2016). Na Figura 1 apresenta-se a representação do efeito estufa.

Figura 1 - O Efeito Estufa



Fonte: Adaptado de ANDERSON, HAWKINS & JONES, 2016.

Alguns gases presentes no ar da atmosfera terrestre reagem quando atingidos pela radiação solar acumulando calor. Esses gases responsáveis pelo processo de absorção da radiação solar foram definidos como *Green House Gas* (GHG) em inglês, ou Gases do Efeito Estufa (GEE) em português (IPCC, 2006). Dessa forma, o acúmulo dos GEE na atmosfera faz com que a temperatura aumente consideravelmente no interior do Planeta ocasionando o fenômeno do aquecimento global (DUNNE, JACKSON, HARTE, 2013).

As causas do agravamento do efeito estufa e seus impactos sobre as mudanças no clima vêm sendo alvo de estudos com o intuito de criar soluções e evitar maiores danos ao meio ambiente e à saúde da população mundial (IPCC, 2007).

Nesse sentido, 195 países assinaram um plano para reduzir as emissões de CO₂ e outros gases do efeito estufa com o objetivo de limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2°C. Esse plano foi estabelecido no fim do ano de 2015 na 21ª Conferência das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas (COP 21) e ficou conhecido como o Acordo de Paris (UNFCCC, 2015; ANDERSON, HAWKINS, JONES, 2016).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) define mudanças climáticas como uma alteração significativa nas condições do clima que persistam por um longo período, cujas causas podem ser devido a processos naturais internos, por forças externas ou ainda por ações antropogênicas (IPCC, 2006).

Já a Convenção Quadro da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) definiu o termo Mudanças Climáticas como uma alteração do clima atribuída direta ou indiretamente às atividades humanas, que altere a condição e composição da atmosfera global além da variabilidade natural do clima quando comparadas à períodos (UNFCCC, 2015).

O IPCC (2007) credita às atividades humanas o motivo do aquecimento do sistema climático resultante do acúmulo de GEE na atmosfera, uma vez que o aumento acentuado da concentração de GEE na atmosfera é atribuído às fontes antropogênicas, como resultado de relações econômicas (INÁCIO, 2010).

As fontes antropogênicas de emissões de gases do efeito estufa estão ligadas principalmente aos processos produtivos em indústrias, queima de

combustíveis fósseis para geração de energia e transporte, decomposição de material biológico através do tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos e uso do solo (IPCC, 2006)

O Painel Intergovernamental realizado pela Organização das Nações Unidas – ONU - busca levantar discussões como forma de incentivar ações de combate às produções ostensivas de poluentes atmosféricos (IPCC, 2018). Nesse sentido, em 1997 na cidade de Quioto no Japão, a ONU organizou um acordo global através do Protocolo de Quioto, que definiu os principais gases do efeito estufa e estabeleceu metas de redução do aquecimento global. São eles:

- Dióxido de Carbono, CO₂;
- Metano, CH₄;
- Óxido Nitroso, N₂O;
- Hexafluoreto de Enxofre, SF₆;
- Hidrofluorcarbonos, HFCs ;
- Perfluorcarbonos, PFCs.

Para padronizar as reduções nas emissões de GEE foi determinado o Global Warming Potencial – GWP -, que representa o potencial de contribuição para aquecimento global para os principais gases do efeito estufa de origem antropogênica. O GWP é uma medida comparativa do GEE com a mesma quantidade de gás carbônico (CO₂) tido como referência (ABRELPE, 2012). Na Tabela 1 são apresentados os principais gases do efeito estufa, seus respectivos GWP e fontes de emissão.

Dentre os GEE apresentados na Tabela 1, destaca-se o gás metano (CH₄), pois possui potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao gás carbônico (CO₂) e sua principal fonte é a decomposição de matéria orgânica em condições anaeróbias. Ou seja, toda a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos depositada em aterros sanitários é transformada em CH₄, altamente prejudicial ao meio ambiente e que permanece ativo na atmosfera durante 12 anos (IPCC, 2013; SIRENE, 2019). O CH₄ representa de 45 a 60% da composição do biogás produzido em aterros sanitários, seguido do dióxido de

carbono (CO₂), e juntos representam até 99% da composição do biogás (VAN ELK, 2007).

Tabela 1 - Valores de GWP para os principais GEE e suas principais fontes de emissão.

Tipo de GEE	Gás (1 t)	GWP	Principais fontes
Dióxido de Carbono	CO ₂	1	<ul style="list-style-type: none"> • Queima de combustíveis fósseis; • Desmatamento; • Produção de cimento.
Metano	CH ₄	28	<ul style="list-style-type: none"> • Aterros sanitários; • Produção de arroz; • Decomposição de matéria orgânica;
Óxido Nitroso	N ₂ O	265	<ul style="list-style-type: none"> • Produção e aplicação de fertilizantes; • Tratamento de efluentes sanitários.
Hexafluoreto de Enxofre	SF ₆	23.500	<ul style="list-style-type: none"> • Produção de alumínio.
Hidrofluorcarbonos	HFC -23	12.400	<ul style="list-style-type: none"> • Refrigerantes.
Perfluorcarbonos	PFC-14	6.630	<ul style="list-style-type: none"> • Transformadores elétricos; • Produção de magnésio.

Fonte: Adaptado de IPCC (2013); UNFCCC, 2013.

Considerando o alto volume de resíduos gerados diariamente, e, sobretudo a parcela de resíduos orgânicos presentes nos resíduos sólidos urbanos em todo o mundo, torna o metano um importante GEE e sua prevenção deve ser considerada essencial nas políticas de redução e mitigação de gases do efeito estufa através de planos de gerenciamento de resíduos sólidos eficientes (LOUREIRO, ZVEIBIL, DUBEUX, 2015).

1.2. Impacto da gestão de resíduos sólidos urbanos sobre as mudanças climáticas

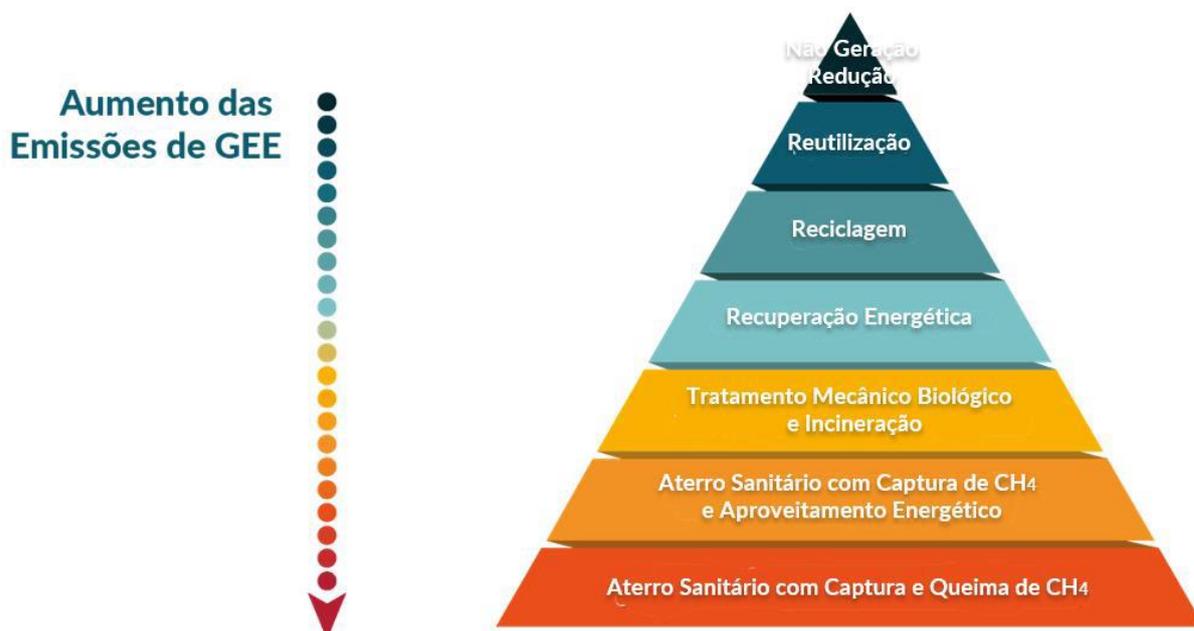
O principal gás do efeito estufa do setor de tratamento de resíduos é o metano, este é proveniente principalmente da decomposição da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários e lixões (FIRMO *et al.*, 2019).

Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), o setor de tratamento de resíduos é responsável por até 5% das emissões de antropogênicas de GEE em escala global (UNEP, 2010). Entretanto, o setor possui potencial para ser um dos maiores redutores de emissões de GEE, uma vez que quando os resíduos são recuperados e reinseridos na cadeia produtiva, as emissões dos processos de extração e transporte dos recursos naturais para produção de matéria-prima são evitadas, afetando positivamente todo fluxo produtivo (REICHERT, 2013; FIRMO *et al.*, 2019).

Desse modo, a gestão de resíduos sólidos urbanos tem papel estratégico nas políticas de proteção ao clima e implementação de uma economia de baixo carbono, porque tem como característica a integração com diversos setores econômicos (REICHERTE, 2013). Assim, o aprimoramento da gestão de resíduos pode contribuir de 15% a 20% para a redução de emissões totais ao considerar todo o ciclo de vida dos materiais conjuntamente com a hierarquia na gestão de resíduos (UNEP/ISWA, 2015; SEEG, 2017; FIRMO *et al.*, 2019).

Na Figura 2 apresentam-se os efeitos da hierarquia de gestão de resíduos na redução de emissão de gases do efeito estufa. Como exemplo, pode-se citar a não geração de resíduos, que diminuirá a emissão de CH₄ em aterros sanitários; A reutilização; o reaproveitamento e a reciclagem de resíduos que evitam emissões em outros setores como exploração de matéria-prima virgem, transporte e indústria (FIRMO *et al.* 2019).

Figura 2 - Hierarquia de gestão de resíduos x emissões de GEE.



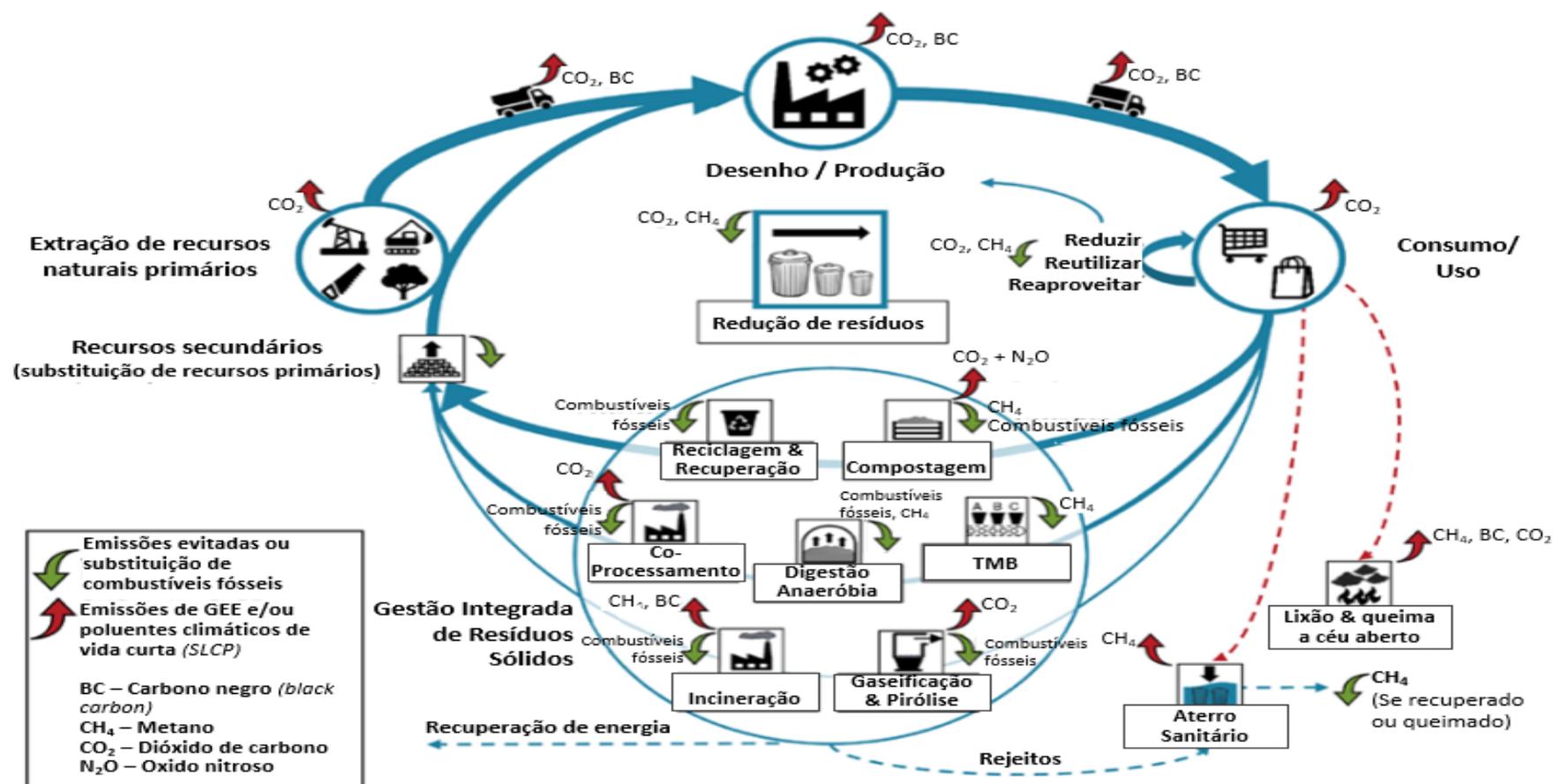
Fonte: FIRMO *et al.* 2019

Entretanto, a economia mundial ainda se baseia por um modelo linear, dado que apenas 13,5% dos resíduos gerados são encaminhados para reciclagem (WORLD BANK, 2018). Para alterar esse quadro é necessário reverter o conceito de fim de vida e introduzir fluxos de reinserção dos materiais na economia constituindo o fluxo de economia circular (CIRCLE ECONOMY, 2018).

É possível assim verificar uma razão direta entre economia circular e redução das emissões de GEE, como representado na Figura 3, onde o gráfico apresenta as emissões mais relevantes em uma economia circular, bem como potenciais de mitigação.

A partir da Figura 3 também é possível entender o real potencial do setor de resíduos nas ações de mitigação das emissões de GEE e, conseqüentemente, proteção quanto às mudanças climáticas. Ressalta-se que sob a ótica da análise do ciclo de vida, a economia circular é fundamental nas estratégias de gestão de emissões de GEE (MERSONI & REICHERT, 2017; FIRMO *et al.* 2019).

Figura 3 - Relação entre economia circular e redução de gases do efeito estufa.



Fonte: FIRMO *et al.* 2019

Seguindo essa lógica, países mais desenvolvidos se empenham na mudança do modelo econômico linear para uma economia circular com resultado direto nas reduções de emissões de GEE (FIRMO *et al.* 2019). Tais mudanças são resultados de acordos intergovernamentais de proteção do clima (UNFCCC, 2015).

Diferenças econômicas e sociais entre os países são pontos determinantes nas decisões sobre as estratégias de redução de emissões de GEE (LOUREIRO, ZVEIBIL, DUBEUX, 2015). Ainda segundo os autores, diferenças culturais e econômicas afetam a emissão de GEE oriundos do setor de resíduos, que em países em desenvolvimento se notabilizam pela disposição final de resíduos em aterros sanitários, sem tratamento prévio, enquanto em países ricos busca-se a valorização de resíduos a caminho da economia circular.

Nesse contexto, destaca-se a União Europeia que a partir do início da década de 1990 empregou esforços voltados a inserção da economia circular em seus países e colhe resultados com reduções significativas de GEE. (RODRIGUES *et al.* 2019). É apresentado na Tabela 2, a evolução das emissões dos resíduos sólidos de 1990 a 2010.

Ao contrário das reduções das emissões apresentadas pelos países desenvolvidos, que migraram de modelos lineares de disposição final dos seus resíduos em aterros sanitários, para o reaproveitamento desses materiais voltados para a economia circular, o Brasil apresentou o aumento superior a 100% em suas emissões de GEE oriundas dos resíduos sólidos em 20 anos (FIRMO *et al.*, 2019).

O aumento se dá pelo crescimento da abrangência da coleta domiciliar de resíduos sólidos urbanos e sua disposição majoritariamente em aterros sanitários, sem reaproveitamento, que apesar de diminuir os demais impactos ambientais frente aos lixões e outras formas indevidas de disposição, ocasiona a geração e emissão de grandes quantidades de CH₄ para a atmosfera (ABRELPE, 2019).

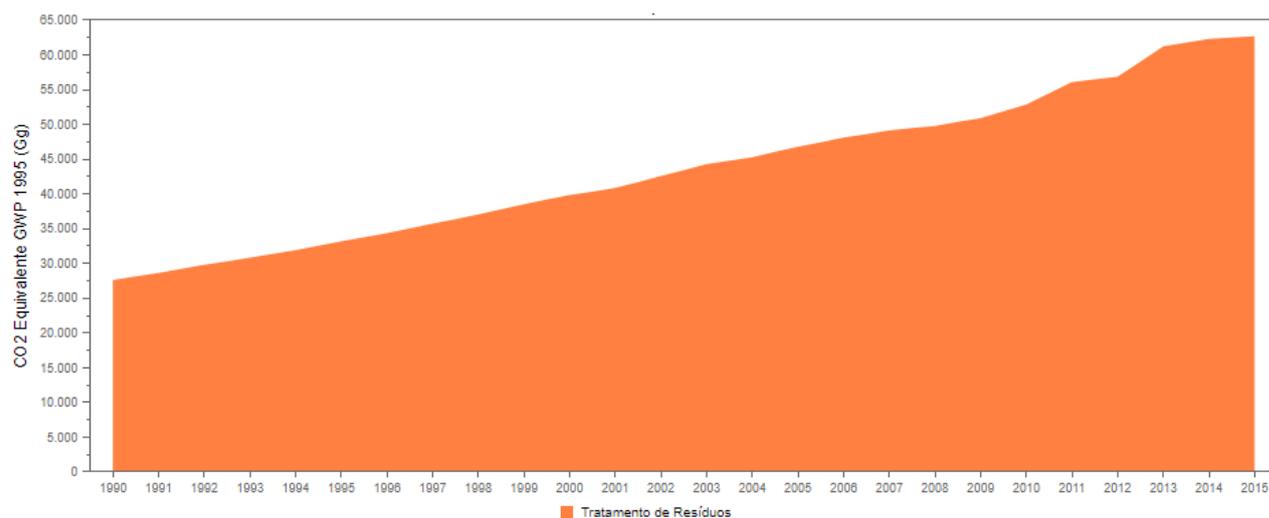
Tabela 2 - Emissões de GEE provenientes dos resíduos sólidos em diversos países (kgCO₂/Habitante).

País	1990	1994	2000	2005	2010	Variação
Alemanha	487	469	300	213	150	-69%
Reino Unido	779	686	473	315	266	-66%
União Europeia	374	366	302	242	222	-41%
Estados Unidos	596	562	404	392	360	-40%
Japão	181	204	203	168	144	-20%
Brasil	115	120	132	152	236	105%

Fonte: Adaptado de LOUREIRO, ZVEIBIL, DUBEUX, 2015.

Apresenta-se na Figura 4 o gráfico do aumento das emissões de GEE do setor de resíduos ao longo dos anos.

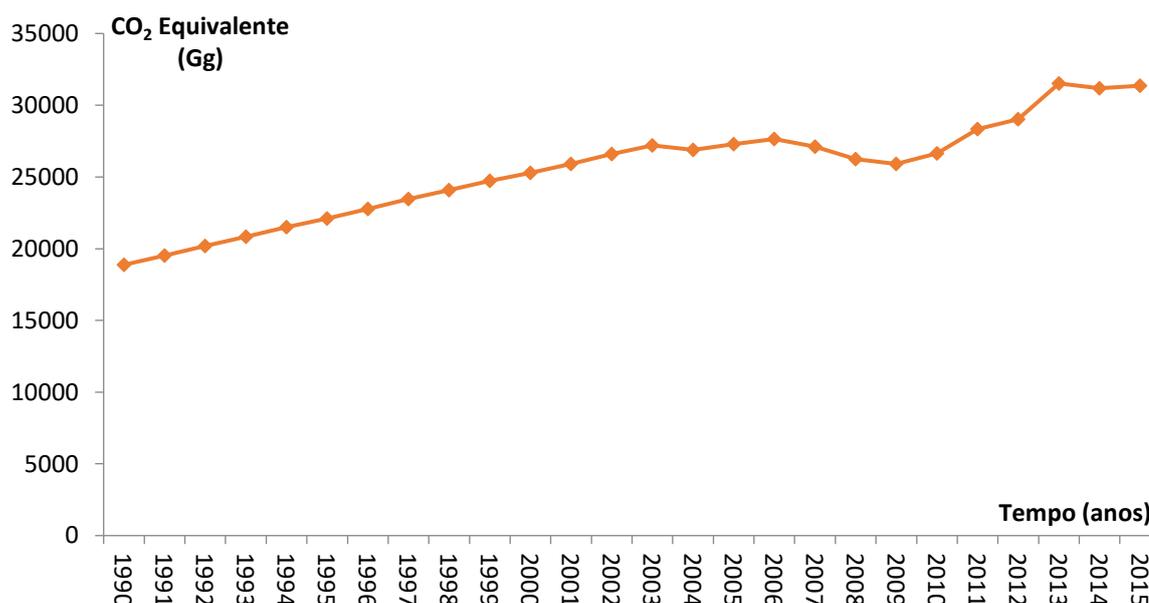
Figura 4 - Evolução da emissão de GEE do setor de tratamento de resíduos no Brasil.



Fonte: SIRENE, 2019.

Segundo o Sistema de Registro Nacional de Emissões – SIRENE (2019), o setor de resíduos é responsável por 5% das emissões de GEE de origem antropogênica no Brasil, o que representa 62.695.100 toneladas de CO₂ Equivalente. Desse total 57,5% representam o CH₄ emitido pela disposição final dos resíduos orgânicos em aterros sanitários e lixões (MCTI, 2015). Apresenta-se na Figura 5 a evolução das emissões de CH₄ de 1990 a 2015.

Figura 5 - Evolução da emissão de CH₄ do setor de tratamento de resíduos no Brasil.



Fonte: SIRENE, 2019.

Importante notar que a ascensão da curva do gráfico da Figura 3 se assemelha com o crescimento da curva do gráfico apresentado na Figura 4, isso se dá pelo fato do metano ser o principal GEE do setor de resíduos, o que está diretamente relacionado com o aumento das emissões do setor de resíduos apresentado na Tabela 2.

O relatório do observatório do clima faz uma análise sobre a evolução das emissões de GEE brasileiras e seus impactos nas metas do país, o documento aponta que no Brasil as emissões do setor de resíduos tiveram crescimento de 600% desde 1970, e aumento 95% entre 2000 e 2018 (SEEG, 2019).

Assim como no Brasil, outros países menos desenvolvidos também concentram as formas de gestão de resíduos na disposição dos RSU diretamente em aterros sanitários, agravando os efeitos nocivos do aquecimento

global (GONÇALVES *et al.*, 2018). Com isso, se faz necessário implementar ações e políticas públicas para reduzir drasticamente as emissões de metano no setor de tratamento de resíduos, principalmente em países em desenvolvimento.

1.3. Gestão de emissões de gases do efeito estufa no Brasil

Para reduzir as emissões de GEE no território brasileiro foi sancionado o Decreto Nº 6.263 de 21 de novembro de 2007, que instituiu o Plano Nacional sobre Mudanças no Clima, que tem o compromisso de combater as emissões de GEE no país (BRASIL, 2007). O Plano incentiva boas práticas ambientais como reciclagem, investimento em tecnologias limpas e de baixo carbono, energias renováveis e principalmente no combate ao desmatamento da Amazônia (BRASIL, 2007).

Já em 29 de dezembro de 2009 foi instituída a Política Nacional de Mudanças do Clima – PNMC - pela Lei Nº 12.187/2009, que estabelece seus principais objetivos e diretrizes no Artigo 5º, buscando atuar na redução de emissões antropogênicas de GEE em suas diferentes fontes (BRASIL, 2009).

Com o objetivo de garantir que o desenvolvimento econômico e social contribua para a proteção do sistema climático global, a PNMC estabeleceu como metas a redução de 36,1% a 38,9% das emissões de GEE até 2020, além de indicar atingir 43% de reduções até 2030 através da Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC - apresentada voluntariamente a UNFCCC (BRASIL, 2009; SEEG, 2019).

Para auxiliar no alcance as metas de redução, a lei estabelece ainda, o desenvolvimento de planos setoriais de mitigação e adaptação nos âmbitos local, regional e nacional (BRASIL, 2020). Entretanto, o que se observa na prática é o aumento expressivo dos casos de desmatamento na Amazônia e no cerrado, além do aumento de 1,3% nas emissões do setor de resíduos entre 2017 e 2018, se distanciando das metas de redução estabelecidas (SEEG, 2019).

A partir do marco inicial da PNMC, 21 dos 27 estados brasileiros implementaram legislação específica sobre clima com diferentes níveis de monitoramento dos resultados. Os Planos Estaduais definem estruturas de governança e instrumentos para atingir os objetivos definidos em lei (BRASIL, 2020). Comumente as legislações abrangem determinações para redução de emissões de GEE através de práticas mais eficientes nos diferentes setores da economia, considerando as vulnerabilidades de cada região e o incentivo às práticas de baixo carbono (FIRMO *et al.*, 2019).

Grande parte dos Estados com legislações para proteção do clima aborda diretamente a gestão de resíduos sólidos urbanos, seja estabelecendo objetivos de redução da geração de resíduos, produção sustentável, reuso e reciclagem de resíduos, ou ainda o aproveitamento energético de biogás. Porém, poucos Estados possuem metas definidas para a redução de GEE, sem, entretanto, definir quais setores específicos serão alcançadas essas reduções (FIRMO *et al.*, 2019).

Em contrapartida, alguns Estados brasileiros definiram dispositivos legais para apresentação de inventários de gases do efeito estufa de forma voluntária por parte do setor industrial, como o caso de São Paulo, Minas Gerais e Paraná (MINAS GERAIS, 2009; CETESB, 2012; PARANÁ, 2012). Já o Rio de Janeiro determinou de forma mandatória a apresentação dos inventários de GEE em seu território (INEA, 2012).

A gestão de resíduos sólidos urbanos se apresenta como eixo estratégico para alcançar as metas de redução e mitigação dos gases do efeito estufa e assim reforçando a necessidade de maior integração entre as Políticas Nacionais de Mudanças Climáticas e de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2013).

Torres, Fermam e Sbragia (2016) indicam que o Artigo 9 da PNMC prevê o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões – MBRE - que será operacionalizado em bolsas de mercadorias e futuros, bolsas de valores e entidades de balcão organizado, autorizadas pela Comissão de Valores Mobiliários – CVM - onde se dará a negociação de títulos mobiliários representativos de emissões evitadas de gases de efeito estufa certificadas.

1.4. Mercado de Carbono

Em virtude dos impactos ambientais provenientes do aquecimento global relacionados diretamente às emissões de Gases do Efeito Estufa – GEE foram instituídas políticas para propor ações de cooperação comercial internacional para mitigação das emissões de GEE (OLIVEIRA; GURGEL; TONRY, 2019).

Neste sentido, em 2006, teve início o mercado de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, definido pelo artigo 12 do Protocolo de Kyoto, sendo aberto para negociações em julho de 2006 (UNFCCC, 2015). Esse mecanismo permite que países desenvolvidos (Anexo I do protocolo de Kyoto) que não consigam atingir suas metas de redução de GEE comprem créditos de carbono de países em desenvolvimento que apresentaram projetos de redução de emissões aprovados como MDL (ABRELPE, 2012).

Bayer e Aklin (2020) entendem o mercado de carbono como uma forma de precificar externalidades e mudar o comportamento de empresas e indivíduos, considerando o custo social do carbono, ou seja, uma forma de monetizar os danos futuros da emissão de carbono. Neste contexto, o custo social do carbono pode ser entendido como uma medida da perda de bem-estar causada pelas emissões de carbono.

Peter-Stanley, Gonzales e Yin, (2013) definem o mercado de carbono como a compra e venda de autorizações para emissões (direito de poluir) ou reduções de emissões (offsets), distribuídas por um órgão regulador ou geradas por projetos de redução de emissões de GEE e assim denominado mercado regulado. Neste sentido destaca-se o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS) como o maior mercado regulado do mundo, sendo responsável pela redução de cerca de 1,2 bilhão de toneladas de CO₂eq entre 2008 e 2016 (3,8%), ou seja, quase a metade do que os governos da UE prometeram reduzir sob seus compromissos no Protocolo de Kyoto. (ABRELPE, 2012; GODOY e SAES, 2015; BAYER e AKLIN, 2020).

Para Paiva *et al.* (2015), o MDL é o instrumento que possibilita países em desenvolvimento a participar do esquema global, ao contabilizar as mitigações de emissões de GEE em projetos de MDL, que após passar por processos de

certificação geram créditos de carbono que serão comercializados por um mercado regulado em ambiente institucional com regras estabelecidas e monitoradas pela ONU.

O MDL habilita a compra de créditos de carbono por um país desenvolvido ou industrializado com limitações para efetuar as reduções das emissões já comprometidas com sua matriz industrial e energética (GODOY, 2013). A transação ocorre na forma de compensação, assim são criados projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento, e com a efetividade dos projetos são gerados créditos de carbono ou Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) (UNFCCC, 2015; GODOY 2013).

Devido às características burocráticas e extremamente criteriosas do mercado regulado, muitos projetos com alto potencial para redução de emissões de GEE não conseguem vencer as barreiras e acabam por não ser executados, sobretudo pelos altos custos envolvidos para atender todas as demandas exigidas (ABRELPE, 2012; GODOY e SAES, 2015).

Em resposta a estas dificuldades foram desenvolvidos os mercados voluntários, onde ocorrem as transações por decisão do comprador para atender demandas de suas organizações. Assim como no mercado regulado os projetos de Reduções Voluntárias de Emissões (VERs) são auditados por organismos independentes e gerados os créditos de carbono (GODOY e SAES, 2015). ABRELPE (2012) destaca a *Gold Standard Certification*, como o principal mercado voluntário de carbono.

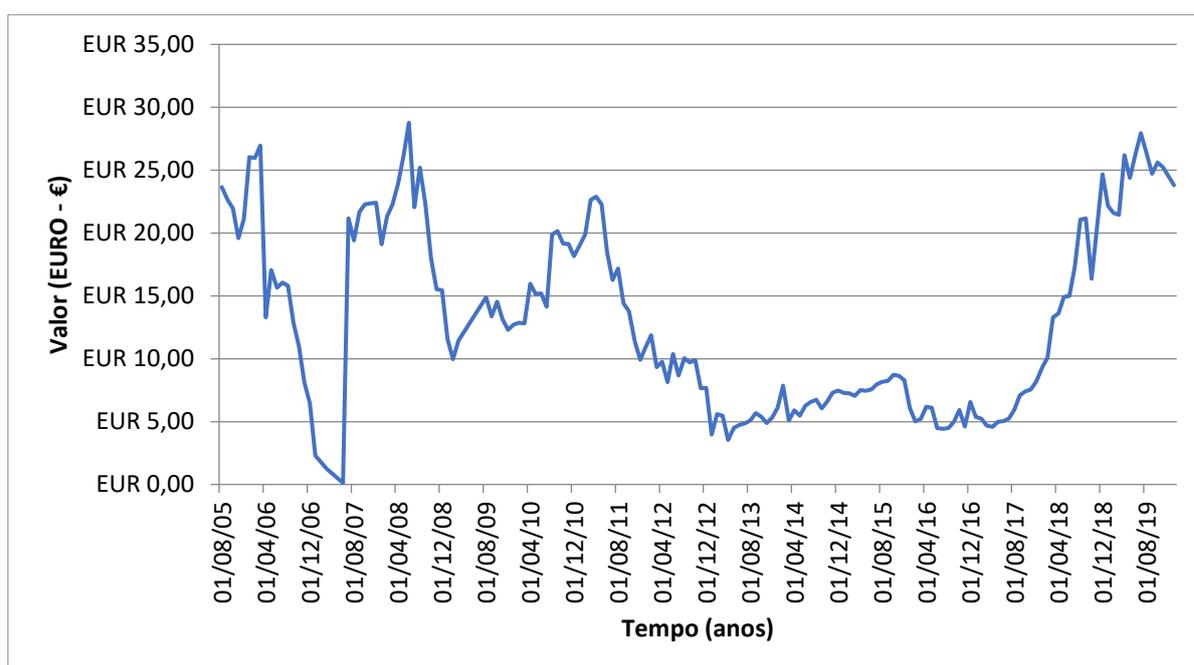
Os mercados de carbono sofreram grandes oscilações na última década, que impactou diretamente o valor das RCEs negociada no mercado vinculado (ABRELPE, 2012). As quais se destacam as saídas de Rússia, Japão e Canadá do Protocolo de Quioto, grandes potências econômicas que migraram para mercados voluntários, que somadas a recessão econômica e diminuição da demanda por créditos de carbono afetaram o valor das RCEs (UNFCCC, 2015).

Previsto para entrar em vigor a partir do ano de 2020, o Acordo de Paris institui compromissos de redução de emissões para países em desenvolvimento, o que proporciona oportunidades de desenvolvimento de mercados de carbono

voluntários, entre eles os mercados nacionais (TORRES, FERMAM E SBRAGIA, 2016).

Outro ponto a favor do desenvolvimento dos mercados voluntários foi a decisão do mercado europeu de restringir a compra de créditos de países considerados “menos desenvolvidos” a partir de 31 de dezembro de 2012 (UNFCCC, 2015). Na Figura 6 apresenta-se a variação do valor de liquidação do crédito de carbono em mercados futuros ao longo dos anos.

Figura 6 - Variação do valor do crédito de carbono ICE EUA futuros.



Fonte: Adaptado de Investing.com, 2020.

Ao analisar a Figura 6, é possível notar a grande instabilidade e volatilidade no início das operações, o que se deve a impossibilidade de transferência das licenças do primeiro para o segundo período de negociação, causando a queda dos preços para 0 (zero) em dezembro de 2007, o que explica a grande depressão no gráfico seguida da forte retomada em 2008 até a estabilização dos valores dos créditos de carbono, oscilando em torno de € 5,00 no período do início de 2013 ao fim de 2017, quando o mercado retomou a valorização e atingiu € 27,95 chegando ao valor médio de € 13,26 para todo o período (BAYER & AKLIN, 2020).

Apresenta-se na Tabela 3 os valores e volume de créditos de carbono negociados ao longo do tempo de funcionamento do mercado de carbono. Os dados foram extraídos da plataforma *online* para mercados financeiros Investing.com.

Tabela 3 - Valores históricos e volume de créditos de carbono negociados.

Data	Preço do RCE (EURO - €)	Volume negociado (1.000)
JAN/20	23,81	8,62
DEZ/19	24,51	277,82
DEZ/18	24,67	313,4
DEZ/17	8,18	184,44
DEZ/16	6,57	212,91
DEZ/15	8,29	275,96
DEZ/14	7,48	39,01
DEZ/13	5,33	17,4
DEZ/12	7,69	3,56
DEZ/11	9,92	0,06
DEZ/10	18,16	-
DEZ/09	12,31	69,1
DEZ/08	15,45	37,35
DEZ/07	22,41	52,89
DEZ/06	6,45	4,19
DEZ/05	21,10	2,02

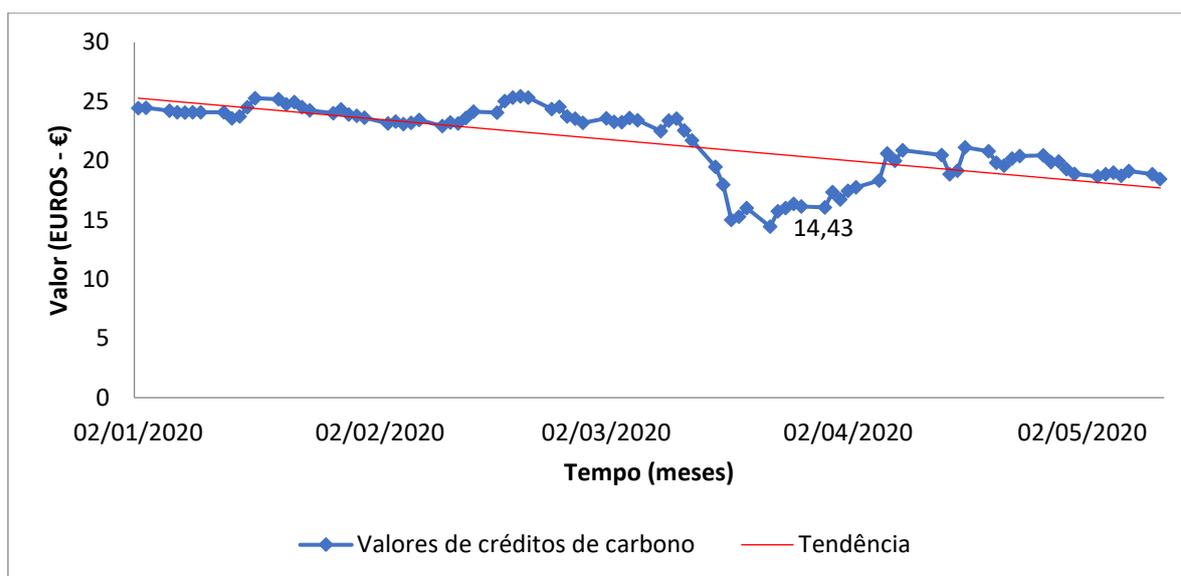
Fonte: Adaptado de Investing.com, 2020.

Para Godoy e Saes (2015), as crises econômicas, as incertezas de mercado e os baixos preços dos créditos de carbono em curto prazo influenciam negativamente os mercados de carbono resultando no desperdício do potencial de negociação.

A exemplo das crises econômicas do passado possivelmente ocorrerá uma queda dos preços dos créditos de carbono em curto prazo, uma vez que a crise econômica estabelecida com o avanço da pandemia do COVID-19 ocasionou a paralização das atividades em diversos os setores da economia em todo o mundo, o que faz com que os limites de emissões de CO₂eq não sejam ultrapassados, e assim não são necessárias as aquisições de créditos de carbono, ocasionando grande disponibilidade de RCEs no mercado e afetando

diretamente seu preço pelo excesso da oferta e escassez de demanda. Na Figura 7 apresenta-se a variação dos valores de créditos de carbono nos primeiros meses da pandemia ocasionada pela COVID-19.

Figura 7- Valores dos créditos de carbono durante a pandemia de COVID-19.



Fonte: Adaptado de Investing.com, 2020.

As autoras Godoy e Saes (2015) defendem que a adoção de metas de redução mais ambiciosas que atinjam maior número de países auxiliaria o desenvolvimento do mercado de carbono, assim como melhorias nas regulamentações, diminuição dos custos de transações e disseminação de informações padronizadas sobre como inventariar as emissões de GEE também contribuiriam positivamente para o desenvolvimento destes mercados.

Neste sentido, durante a COP 21, o Brasil apresentou propostas para ampliação do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL+), que acabou por ser incorporado ao artigo 6º do Acordo de Paris, como Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável (MDS), fortalecendo a tendência de fortalecimento do mercado de carbono focado em interesses compartilhados de mitigação e de desenvolvimento sustentável, sem diferenciação de grupos de partes (SANTOS, ROMANEL, VAN ELK, 2017; IPEA, 2018).

1.5. Projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo no Brasil

Para a Comissão Interministerial de Mudanças Globais de Clima - CIMGC (2016), o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL consiste no desenvolvimento de projetos que reduzam as emissões de gases de efeito estufa, estes projetos são implementados em países menos desenvolvidos e em desenvolvimento, os quais podem vender essas reduções de emissão obtidas, chamadas de créditos de carbono ou Reduções Certificadas de Emissão (RCEs), para os países desenvolvidos auxiliando-os assim, a cumprir as suas metas e compromissos de redução de GEE.

A Comissão Interministerial de Mudanças Globais de Clima divide os projetos de MDL em dois formatos (CIMGC, 2016):

- I. Atividades de projetos: São medidas, operações ou ações que tenham o objetivo de reduzir as emissões de GEE;
- II. Programas de Atividades – PoA: Consistem em ações voluntárias, gerenciadas por entidades públicas ou privadas que implementam objetivos, políticas ou medidas de redução de GEE. São incorporados aos PoAs ilimitadas atividades programáticas que tenham a mesmas características e finalidades, estas atividades são chamadas CPAS.

No caso do Brasil, a participação no mercado de carbono ocorre por meio do MDL, por ser o único mecanismo do Protocolo de Quioto que admite a participação voluntária de países em desenvolvimento (BRASIL, 2019b).

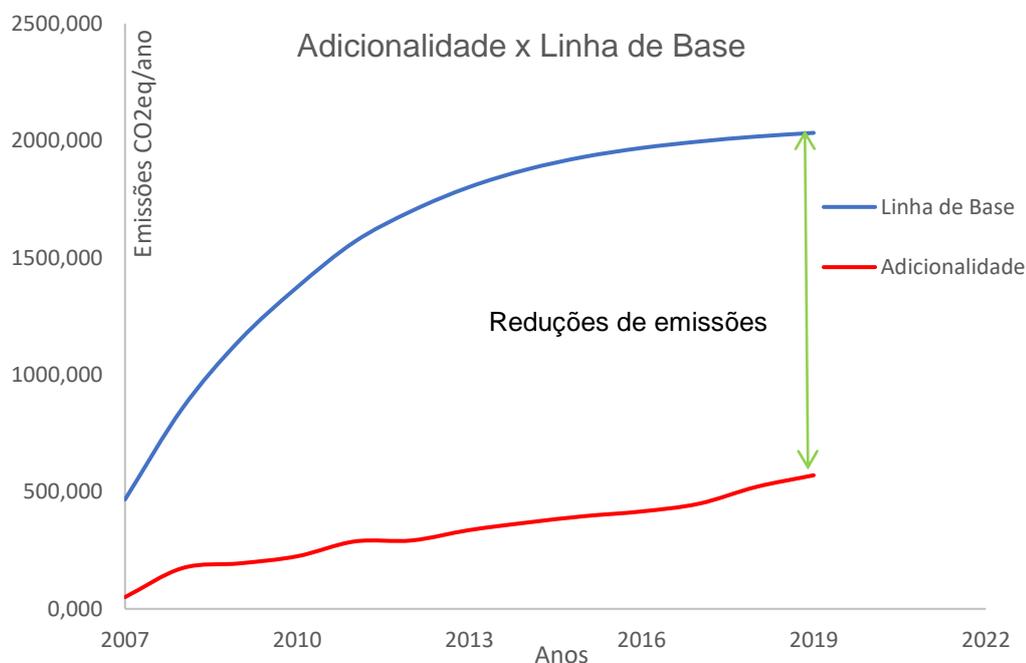
Os projetos de MDL, por princípio, devem promover o desenvolvimento sustentável e auxiliar na redução de emissão dos principais GEE classificados pelo IPCC: CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, SF₆ e PFCs (CIMGC, 2016).

Os projetos de MDL devem ser voluntários e os recursos obtidos através dos RCEs devem favorecer a execução do projeto, atendendo assim os princípios de voluntariedade e adicionalidade (IPEA, 2018).

A adicionalidade significa a redução das emissões de GEE resultantes da aplicação do projeto de MDL, ou ainda a comprovação da contribuição adicional ao padrão de referência existente na ausência do projeto MDL, onde este padrão

representa a linha de base (ICLEI, 2009). Na Figura 8 é exemplificada a relação entre as emissões de GEE no cenário de linha de base e as reduções das emissões resultantes da aplicação de projetos de redução de gases.

Figura 8 - Adicionalidade e Linha de Base.



Fonte: O Autor, 2020.

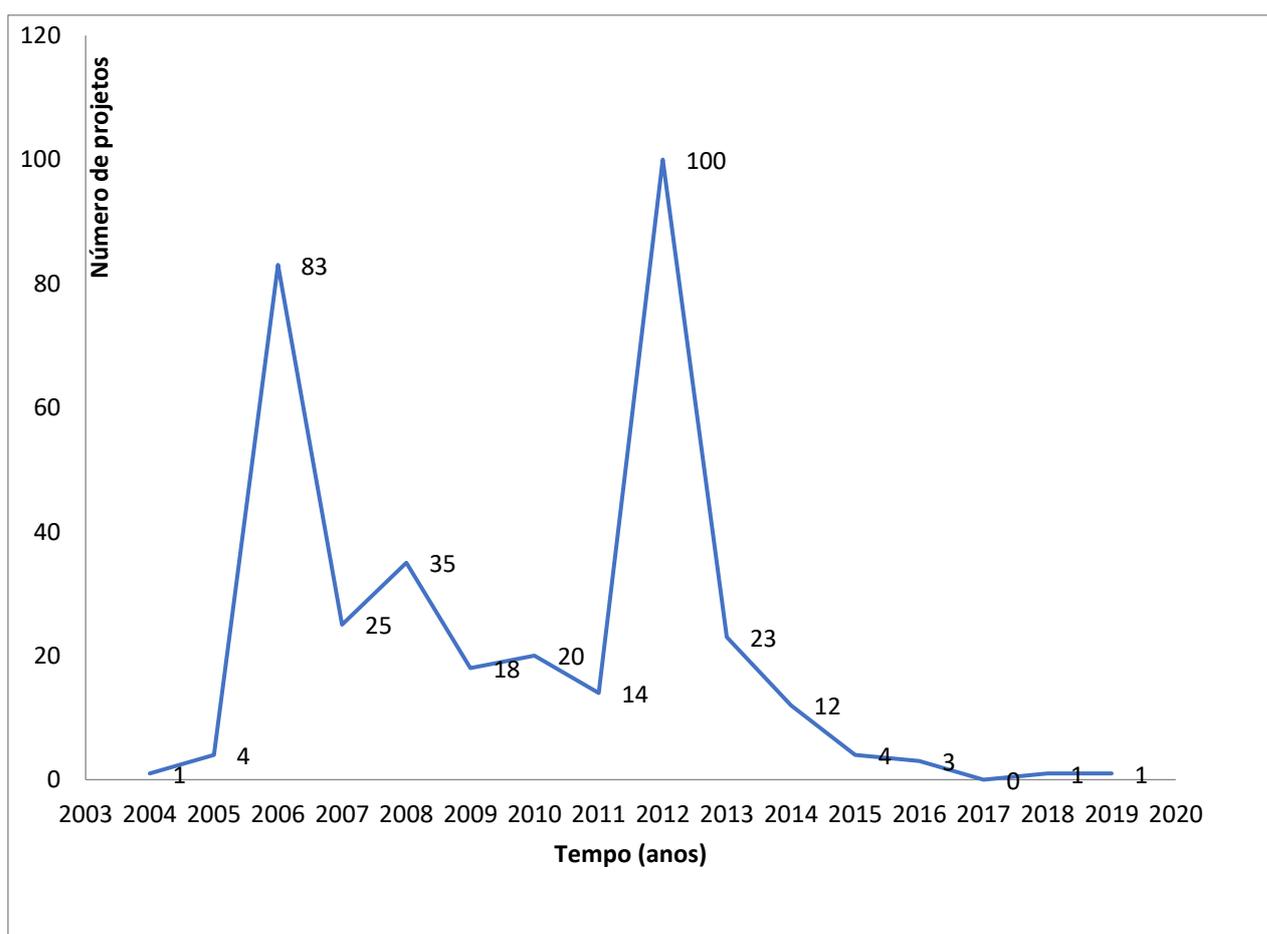
A aprovação e obtenção de RCEs incluem rigorosos mecanismos de registro, garantias de desempenho, redundância e segurança dos dados (IPEA, 2018). É necessário, dentre outros procedimentos, definir a Autoridade Nacional Designada (AND), no caso do Brasil, a responsabilidade pela aprovação de projetos MDL é representada pela Comissão Interministerial de Mudanças Globais do Clima (CIMGC, 2016). Desse modo o processo de obtenção de créditos de carbono segue as seguintes etapas:

- I. Desenvolvimento do Documento de Concepção do Projeto (DCP) pelo Proponente de Projeto (PP);
- II. Validação pela Entidade Operacional Designada (EOD);
- III. Aprovação Nacional pela Autoridade Nacional Designada (AND);
- IV. Registro no Comitê Executivo do MDL (EB);

- V. Monitoramento;
- VI. Verificação;
- VII. Emissão dos RCEs.

Bienalmente o Brasil atualiza as informações sobre seus projetos de reduções de emissões no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, por meio do Relatório de Atualização Bienal do Brasil (BUR, na sigla em inglês), entretanto é possível obter tais informações atualizadas diretamente na página da UNFCCC na internet. Apresenta-se na Figura 9 a evolução da quantidade de projetos de MDL registrados pelo Brasil (Brasil, 2019b).

Figura 9 - Evolução do registro de projetos de MDL no Brasil.



Fonte: Adaptado de UNFCCC, 2020.

Ao analisar a Figura 9 é possível notar dois grandes picos que representam maior incidência de aplicação de projetos de MDL no Brasil. Essa elevação se deu inicialmente em 2006 quando o mercado de carbono teve o início de suas operações de forma plena, o que alavancou a implementação de projetos MDL.

Já o segundo pico apresentado na Figura 9, representa a elevação de projetos implementados antes do fim do primeiro período creditório ao final de 2012 estabelecido pelo Protocolo de Quioto, assim pela incerteza do mercado de carbono somada a impossibilidade dos países europeus adquirir os RCEs brasileiros a partir de 2013, fez com que os investidores brasileiros se antecipassem e registrassem os projetos MDL antes das saídas dos compradores europeus.

Apresenta-se na Tabela 4 os projetos de MDL brasileiros, atualmente o Brasil possui 344 projetos de MDL registrados pelo Conselho Executivo do MDL, equivalente a 4,4% do total mundial, e ocupa a terceira posição quanto ao número de projetos registrados, perdendo para China e Índia (UNFCCC, 2020). O número total de reduções de emissões de GEE de projetos brasileiros atingiu 379 milhões em dezembro de 2019 (BRASIL, 2019b; UNFCCC 2020).

As hidrelétricas representam o maior número de projetos registrados no Brasil (96), seguidos por projetos de Biogás gerados por resíduos rurais (63), Usinas Eólicas (57) e Gás de Aterro (52). Em relação ao potencial de redução de GEE destacam-se, além dos projetos de hidrelétricas, os projetos relacionados a Gás de Aterro, Biogás de resíduos rurais e Decomposição de N₂O que juntos representam 79% do potencial de redução de GEE.

Estes dados comprovam o potencial dos resíduos sólidos urbanos nas estratégias de redução de gases do efeito estufa, pois de todos os projetos brasileiros, 48% estão relacionados ao aproveitamento da carga orgânica dos materiais a serem descartados. Entretanto, projetos de MDL que buscam reduzir as emissões através da não geração de metano ainda são pouco explorados, apenas 9 projetos registrados, apesar do grande potencial de redução de GEE ao evitar que seja gerado CH₄ ao realizar o tratamento de resíduos (UNFCCC, 2020).

Tabela 4 - Atualização dos projetos de MDL brasileiros.

Tipos de Projeto	Atividades de Projeto		Redução estimada de emissão de	
	MDL		GEE	
	Quantidade	% em relação ao total	(tCO ₂ eq)	% em relação ao total
Hidrelétrica	96	27,9	138.520.878	36,6
Biogás	63	18,3	24.861.823	6,6
Usina Eólica	57	16,6	44.306.593	11,7
Gás de aterro	52	15,1	91.367.345	24,2
Biomassa energética	41	11,9	16.091.394	4,3
Substituição de combustível fóssil	9	2,6	2.664.006	0,7
Metano evitado	9	2,6	8.627.473	2,3
Decomposição de N₂O	5	1,5	44.660.882	11,8
Utilização e recuperação de calor	4	1,2	2.986.000	0,8
Reflorestamento e florestamento	3	0,9	2.408.842	0,6
Uso de materiais	1	0,3	199.959	0,1
Energia solar fotovoltaica	1	0,3	6.594	0,0
Eficiência energética	1	0,3	382.214	0,1
Substituição de SF	1	0,3	1.923.005	0,5
Redução e substituição de PFC	1	0,3	80.286	0,0
Total	344	100	379.087.294	100

Fonte: Adaptado de Brasil, 2019b; UNFCCC, 2020.

A grande quantidade de projetos MDL relacionados a captura de biogás de aterros sanitários em comparação à outras tecnologias de tratamento de resíduos, pode ser explicada pela falta de valorização dos resíduos orgânicos na matriz de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no país, o que ocasiona uma demanda superior por projetos que visem a captura e reaproveitamento de biogás devido ao grande volume e impactos significativos destes GEEs.

Assim como defendido por Torres, Fermam e Sbragia (2016) que destacaram as possibilidades do setor de resíduos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, soma-se o potencial de contribuição na redução de GEE

da compostagem ao evitar a geração e emissão de CH₄, bem como a aquisição de créditos de carbono.

1.6. Metodologias para projetos de MDL no setor de resíduos

Com a finalidade de quantificar as emissões e as possíveis emissões evitadas a UNFCCC desenvolveu e aprovou metodologias de cálculo específicas para os mais variados setores (IPEA, 2018). Na Tabela 5 são apresentadas as metodologias MDL aprovadas para gerenciamento de resíduos separadas por tipo de projeto.

Tabela 5 - Metodologias para projetos MDL aprovadas para gerenciamento de resíduos por tipo de projeto.

Tipo de Projeto		Metodologias						
Tratamento Alternativo Compostagem	–	ACM0022		AMS-III.F.		AMS-III.AF.		
Tratamento Alternativo Outras tecnologias	–	AM0112	ACM002	AMS-III.E.	AMS-III.L.	AMS-III.R.	AMS-III.Y.	AMS-III.BJ.
Tratamento alternativo Aeróbio	–	AM0083		AM0093		AMS-III.AX.		
Gás de Aterro		ACM0001				AMS-III.G.		
Lagoas e biodigestores Biogás	–	ACM0014		AMS-III.H.		AMS-III.AO.		
Resíduos de fezes de animais		AM0073		ACM0010		AMS-III.D.		
Tratamento aeróbio de efluentes	de	AM0080				AMS-II.I.		
Metano biogênico		AM0053	AM0069	AM0075	ACM0024	AMS-III.O.	AMS-III.R.	

Fonte: UNFCCC, 2019.

O livro de metodologias de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) atualizado pela UNFCCC em novembro 2019, aponta 30 metodologias aprovadas para projetos de MDL capazes de gerar créditos de carbono no setor de resíduos sólidos urbanos.

Dentre as metodologias apresentadas na Tabela 5 destaca-se a AMS-III.F.: *Avoidance of methane emissions through composting --- Version 12.0*, que aborda a técnica de tratamento de resíduos orgânicos pela compostagem em pequena escala, considerando os RCEs pelo metano evitado, e dessa forma possibilita às iniciativas de tratamento de resíduos orgânicos o pleito aos créditos de carbono, o que favorece a gestão de resíduos descentralizada (UNFCCC, 2016). Outra possibilidade para se inventariar as emissões de GEE na compostagem é a utilização da ferramenta *Methodological tool Project and leakage emissions from composting – Version 02.0* (UNFCCC, 2017).

1.7. Gestão de resíduos orgânicos no Brasil.

A massa de resíduos recicláveis coletados por meio de coleta seletiva em 2018 no Brasil foi de 1,7 milhão de toneladas, ou seja, a cada 10 kg de resíduos apenas 0,411 kg são coletados seletivamente, ou ainda 14,4 kg/hab./ano (BRASIL, 2019a). Estes números corroboram com o que Zago e Barros (2019) apontam como decorrência da falta de valorização dos resíduos e seu consequente desperdício pelo desconhecimento dos seus benefícios quando reaproveitados

Quanto aos resíduos orgânicos, o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos aponta a presença de uma parcela de 50% no total dos resíduos gerados, porém menos de 0,19% chegaram a unidades de compostagem para tratamento evitando os impactos ambientais, como a geração e lançamento do gás metano para a atmosfera decorrente da decomposição da matéria orgânica em condições anaeróbias (BRASIL, 2019a),

De acordo com Zago e Barros (2019) pode-se estimar a partir de fontes secundárias, que foram gerados 32,5 milhões de toneladas de resíduos

orgânicos - 50% da geração anual de RSU em 2018 - no país. Porém, apenas 124 mil toneladas deste total foram desviadas dos aterros sanitários para tratamento adequando como a utilização de compostagem (BRASIL, 2019a).

A fragilidade financeira é um fator preponderante para o insucesso nas iniciativas de gestão de resíduos, sobretudo na gestão de resíduos orgânicos, uma vez que apresenta baixo valor de mercado, e somado ao desconhecimento sobre os impactos ambientais relacionados a eles, os resíduos orgânicos são considerados apenas custos a serem eliminados (MASSUKADO *et al.*, 2013).

O relatório da ABRELPE destaca que foram investidos R\$ 28 bilhões no manejo de resíduos sólidos urbanos no ano de 2018, gerando 332 mil empregos diretos, o que aponta em média o valor de investimento de R\$ 10,15 por habitante e representa um recuo de 1,4% no setor (ABRELPE, 2019).

Apesar das imposições legais criadas com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que determina expressamente os atores públicos e privados como responsáveis por articularem meios de valorizar e reutilizar o composto produzido ao fim do tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, reintroduzindo-os na cadeia produtiva e assim atendendo as premissas da economia circular, poucas iniciativas de compostagem são vistas no contexto nacional (BRASIL, 2010; BRASIL; 2019a).

Como forma de valorizar os resíduos orgânicos é possível realizar o seu tratamento com técnicas como a compostagem e a biodigestão (SILVA, ROCHA, SILVA, 2018). Estas técnicas possuem como subproduto um composto orgânico rico em nutrientes para aplicação no solo em plantações de alimentos e como corretivos de solos ácidos, dessa forma o composto produzido ao fim do processo pode ser comercializado como adubo ou utilizado para agregar valor a um produto produzido a partir dele (FREITAS, 2016). Além disso, quando realizada a decomposição anaeróbia, é possível captar o CH₄ para gerar energia elétrica a partir da queima do gás metano.

Além de atender a ordem hierárquica no gerenciamento de resíduos, estabelecida pelo artigo 9º da Lei 12.305/2010, priorizando o tratamento dos resíduos, a reinserção dos materiais orgânicos na cadeia produtiva tem resultados positivos na economia, uma vez que estes deixam de ser apenas

custos para se tornar matérias-primas, possibilitando a criação de novos postos de trabalho diretos e indiretos, trazendo novamente para o mercado de trabalho parte da população que não possui renda fixa (RODRIGUES *et al.*, 2019).

Apesar das possibilidades de reaproveitamento, existem poucas usinas ou pátios de compostagem em operação no Brasil. O Diagnóstico de Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos de 2018 informou apenas 70 unidades em funcionamento gerenciadas direta ou indiretamente pelos municípios no país, sendo que, deste total, 50 operam na região sudeste e 12 se localizam na região sul do país (BRASIL 2019a). Os números demonstram a deficiência no setor mesmo com a oferta de resíduos orgânicos disponíveis e necessidade de atendimento à legislação.

Ao analisar os dados informados nos relatórios de resíduos anuais anteriores, Zago e Barros (2019) observaram uma inicial evolução no número de unidades de compostagem no país, passando de 157 no ano de 2000 e alcançando o número máximo de 211 unidades em 2008. Em seguida ocorreu decréscimo significativo na quantidade de usinas de compostagem, chegando a 103 unidades no ano de 2015, decrescendo até a quantidade de iniciativas de compostagem atuais (ZAGO E BARROS, 2019; BRASIL, 2019a).

Para Siqueira e Assad (2015), a redução na quantidade de unidades de usinas e a curta vida útil das iniciativas de compostagem historicamente ocorrem devido à dificuldade de segregar os resíduos orgânicos diretamente na fonte geradora de forma eficiente, o que ocasiona o envio dos resíduos misturados com os demais materiais e impossibilita a separação posterior, além de propiciar a contaminação dos resíduos orgânicos com metais pesados, por exemplo.

Com os resíduos contaminados, a produção de composto orgânico fica comprometida pela baixa qualidade do produto e, conseqüentemente, ocorre à recusa do mercado consumidor (FREITAS, 2016).

Soma-se ainda a estes fatores, a falta de planejamento adequado e deficiência de capacidade institucional, técnica e financeira dos municípios para a implantação e operação das usinas de compostagem, juntamente com a aplicação inadequada das tecnologias, tornando o projeto incompatível com a

realidade do local onde os empreendimentos estão inseridos (RODRIGUES *et al.*, 2019).

Zago e Barros (2019) incluem também a falta de programas e ações governamentais voltadas à compostagem como outro fator contribuinte para o insucesso da valorização de resíduos orgânicos no país.

Em contrapartida, o 4º caderno temático do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), fala sobre experiências bem sucedidas de valorização de resíduos orgânicos no Brasil e credita o sucesso dessas iniciativas à diversificação das estratégias de reciclagem, aproveitamento de diferentes escalas de geração de resíduos e descentralização do tratamento para redução dos custos com a coleta e transporte dos resíduos orgânicos até o local de disposição final (RODRIGUES *et al.*, 2019).

Como fator decisivo para o êxito desses empreendimentos, está o sucesso na segregação dos resíduos orgânicos na fonte geradora através da sensibilização e mobilização de parte da população, que entendeu a mudança de hábitos, permitindo a sensação de pertencimento e protagonismo nessas ações como um processo de transformação cultural e de comportamentos frente à gestão de resíduos orgânicos no país (SIQUEIRA e ASSAD, 2015; FREITAS, 2016).

Para reverter o quadro nacional de desvalorização dos resíduos orgânicos, o caderno temático criou estratégias e metas para alcançar as mudanças almejadas de forma gradual, com foco principal nas mudanças culturais da sociedade brasileira em relação à gestão de resíduos orgânicos (RODRIGUES *et al.*, 2019).

O planejamento apresentado pelo PLANSAB determina metas de aumento do desvio de resíduos orgânicos de aterros sanitários para meios de tratamento com valorização dos resíduos, passando da situação atual, 0,19% em 2018, até 11% em 2033 (BRASIL, 2019a; RODRIGUES *et al.*, 2019).

1.8. Compostagem

A compostagem se apresenta como uma importante ferramenta para valorização dos resíduos orgânicos no Brasil (RODRIGUES *et al.*, 2019). Com a utilização desta técnica é possível diminuir a quantidade de resíduos enviados para os aterros sanitários e conseqüentemente evitar os impactos ambientais causados pela emissão de CH₄ para atmosfera, bem como a não geração de lixiviado, líquido altamente tóxico gerado após a decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos (ANDERSEN *et al.*, 2012; VERAS, 2018).

Este capítulo detalha como a adoção da técnica de compostagem auxilia na valorização dos resíduos e reduz as emissões de GEE para a atmosfera, sendo uma alternativa economicamente viável e tecnicamente vantajosa frente aos meios mais utilizados para tratamento e disposição dos resíduos orgânicos (RODRIGUES *et al.*, 2019).

A compostagem pode ser entendida como um processo controlado de degradação e estabilização da matéria orgânica, o qual transforma os resíduos orgânicos em um produto para correção do solo (FREITAS, 2016). Segundo Nascimento (2017), o processo de decomposição natural se torna mais eficiente ao utilizar técnicas de engenharia baseadas nas características físicas e químicas dos materiais empregados, mantendo controlada a temperatura, umidade, bem como a relação entre Carbono e Nitrogênio. Ou seja, a compostagem é uma forma mais rápida e eficiente para se obter um composto em melhores condições que a natureza levaria tempo indeterminado para estabilizar (VERAS, 2018).

Veras (2018) considera ainda que as definições de compostagem podem variar conforme a finalidade e objetivo esperado, porém ambas possuem aspectos aeróbios e termofílicos. A Resolução nº 481/2017 do Conselho Nacional do Meio Ambiente definiu compostagem como (BRASIL, 2017):

"Compostagem: processo de decomposição biológica controlada dos resíduos orgânicos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições aeróbias e termofílicas, resultando em

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

Por se tratar de um processo natural, a produção de composto a partir da decomposição da matéria orgânica está presente na humanidade há cerca de 4.500 anos, tendo seus primeiros registros de aplicação na agricultura na Mesopotâmia, durante o período do Império Akkad (FREITAS, 2016).

1.8.1. Compostagem como mecanismo redutor de Gases do Efeito Estufa – GEE

Quando dispostos em aterros sanitários, os resíduos orgânicos são decompostos em condições anaeróbias gerando grande quantidade do gás metano como resultado da ação de bactérias metanogênicas (VERAS, 2018). O autor cita que são geradas até 70 milhões de toneladas de metano anualmente em todo o mundo através de resíduos, sendo este responsável por aproximadamente 20% das emissões de fontes antropogênicas globais.

Dessa forma, a compostagem se apresenta como uma forma eficaz para tratamento de resíduos orgânicos com baixo impacto ambiental, isso porque, durante o processo de decomposição de matéria orgânica em condições aeróbias, o principal produto do processo é o gás carbônico, sem a presença de metano (SOUZA *et al.*, 2019).

Além de evitar as emissões de CH₄ para atmosfera, a compostagem realiza a fixação de carbono pelos processos biológicos durante a degradação de matéria orgânica, o que, segundo Sánchez *et al.* (2015), deve ser desconsiderado como fonte de emissão de CO₂ contribuinte para o agravamento do efeito estufa.

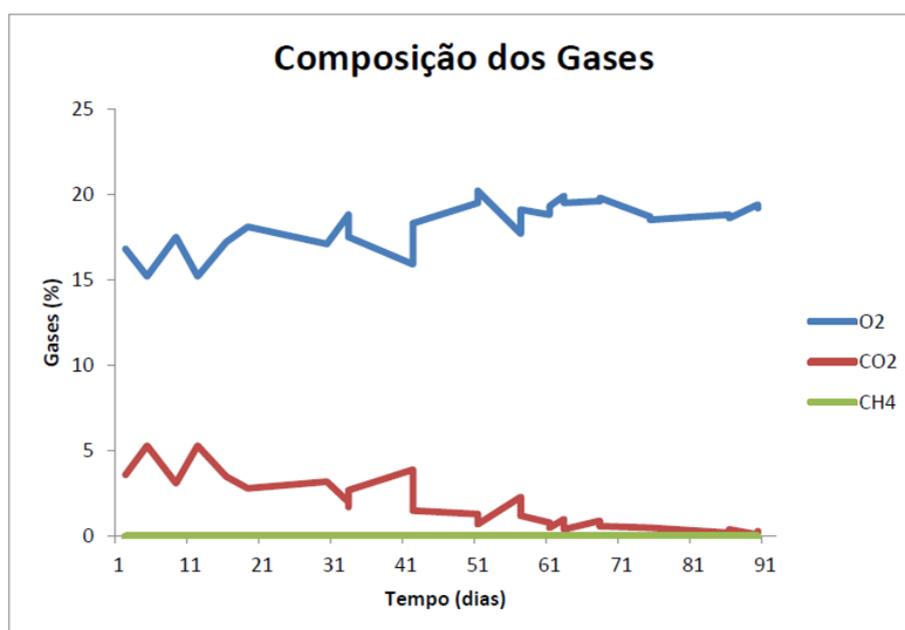
Entretanto, ainda ocorre a geração de CO₂ devido ao consumo de combustíveis fósseis pelos veículos de transporte de resíduos e equipamentos para operação do sistema de compostagem (SÁNCHEZ *et al.*, 2015). Além destes, o consumo de energia elétrica nas instalações das usinas deve ser contabilizado como fontes de emissão de gases do efeito estufa.

Nesse sentido, Lima Junior *et al.* (2017) recomendam a adoção de compostagem de forma descentralizada para diminuir as emissões de gases pelo consumo de combustíveis ao realizar o processo em local próximo à fonte geradora de resíduos.

Dentre as técnicas de compostagem, o método realizado em leiras estáticas aeradas apresenta vantagens em relação às emissões de gás carbônico pelo processo de leiras revolvidas, isso devido à ausência do consumo de combustíveis fósseis do maquinário para revolvimento de leiras, uma vez que, nas leiras estáticas, a aeração é realizada por sopradores de ar alimentados por energia elétrica (ERMOLAEV, *et al.*, 2014).

Veras (2018) realizou leituras em leiras estáticas com aeração passiva durante 90 dias, não detectando traços de metano durante todas as medições, como demonstrado na Figura 10, que apresenta a composição dos gases encontrados no ar sobre as leiras de compostagem. Corroborando com Manios *et al.* (2007) que encontram resultados semelhantes no estudo realizado em leiras revolvidas, porém foi detectado 0,04% de CH₄ após 97 dias de medições.

Figura 10 - Composição dos Gases no ar sobre as leiras de compostagem.



Fonte: Veras, 2018.

No início do processo, ocorre consumo de grandes quantidades de oxigênio devido a ação dos microrganismos, isso faz com que aumente a probabilidade de geração de metano caso a oxigenação não seja corrigida a tempo (BECK-FRIIS *et al.*, 2000). Além disso, as dimensões e estruturas das leiras implicam na geração de CH₄ ao impossibilitar que o O₂ chegue em condições ideais em toda área da leira (INÁCIO *et al.*, 2009).

Nesse sentido Inácio, (2010) desenvolveu pesquisa científica para determinação de um fator médio de emissão de metano específico para compostagem. Seu trabalho estimou que para cada tonelada de resíduo orgânico são gerados 1,2 kg de CH₄, o que representa uma redução de emissões de metano superiores à 86%.

Alguns aspectos podem contribuir para a minimização das emissões de CH₄ na compostagem, sendo o mais relevante a introdução de organismos metanotróficos como inoculo para oxidar o metano gerado no interior das leiras (INÁCIO *et al.*, 2009). Esses organismos têm melhores condições de crescimento e oxidação de CH₄ em faixas mesófilas de temperatura, chegando à eficiência de 98% (JACKEL, THUMMES e KAMPFER, 2005).

Lima Junior *et al.* (2017) detectaram percentuais considerados desprezíveis de CH₄ próximos a 0,00% ao estudar métodos de compostagem em leiras estáticas com aeração passiva. Os autores, porém, utilizaram composto em maturação como inoculo de microrganismos metanotróficos para oxidar o metano eventualmente produzido, conforme sugerido por Jackel, Thummes e Kampfer (2005) e Inácio *et al.* (2009).

Ao realizar estudos sobre avaliação do ciclo de vida sobre alternativas para tratamento e disposição final de resíduos orgânicos, Saer *et al.* (2013) concluem que a compostagem gera impactos ambientais menos significativos quando comparados à demais métodos de tratamento, como disposição em aterros sanitários, incineração e biometanização. Considerando ainda a eficiência dos sistemas de captação de gases dos aterros sanitários, Lima Junior *et al.* (2017) ao realizar compostagem descentralizada, estimaram uma redução de 34% nas emissões de carbono equivalente.

Tais dados corroboram com a pesquisa realizada por Reichert e Mendes (2014), que ao realizar ACV considerando a gestão de resíduos do município de Porto Alegre / RS, concluíram que um sistema de gestão integrado do resíduos sólidos urbanos deve considerar a compostagem como uma das principais formas de destinação final dos resíduos, pois com o uso dessa tecnologia não ocorre a geração de lixiviado e são emitidos menos gases do efeito estufa no processo.

. Inácio, Bettio e Miller (2009), destacam que a mitigação das emissões de gases do efeito estufa através da adoção da compostagem como método de tratamento de resíduos orgânicos, possui potencial significativo para obtenção de créditos de carbono.

1.8.2 Vantagens da utilização da Compostagem

A utilização da compostagem proporciona vantagens frente a outros meios de disposição de resíduos orgânicos, uma vez que possibilita o tratamento da fração orgânica dos resíduos evitando seu depósito em aterros sanitários ou que estes sejam vazados em locais inadequados (SILVA; ROCHA; SILVA, 2018).

Com isso, impede a geração de lixiviado como resultado da decomposição não controlada da matéria orgânica, além de evitar que sejam emitidas grandes quantidades do gás metano, altamente poluente e com elevado potencial de aumento do efeito estufa para a atmosfera com o emprego das técnicas de compostagem (VERAS, 2018).

É apresentada na Tabela 6 uma comparação entre a compostagem e aterros sanitários como forma de tratamento dos resíduos sólidos orgânicos, ponderando as principais características técnicas e econômicas.

Tabela 6 - Comparação entre as características da compostagem e aterros sanitários

	Compostagem	Aterros Sanitários
Necessidade de área para operação	Médio: Apesar da necessidade de disposição dos resíduos em leiras extensas, assim que finalizado o processo o local fica novamente disponível.	Alto: Demanda de grandes áreas para instalação e operação, sem possibilidade de reaproveitamento para continuidade do projeto.
Custos de Instalação e Operação	Baixo: Os custos estão relacionados principalmente a aquisição do local de instalação, uma vez que a operação é feita com maquinário de simples tecnologia.	Alto: Os custos para instalação e operação por demandar de tecnologias de prevenção da poluição até 20 anos após seu encerramento.
Potencial poluidor	Baixo: A atividade possui baixo potencial poluidor, pois não gera lixiviado e CH ₄ no processo.	Alto: Os impactos ambientais relacionados aos aterros sanitários são significativos, podendo contaminar lençóis freáticos, a atmosfera e a saúde humana.
Vida útil do empreendimento	Alto: Não há restrição de tempo de vida para a atividade, dependendo apenas da gestão do negócio.	Baixo: Independente da gestão do empreendimento a operação tem em média 20 anos de prazo e seu monitoramento demanda mais 20 anos.
Complexidade da operação	Baixo: Operação simples realizada por equipamentos para revolvimento e peneiramento do material estabilizado.	Alto: A operação envolve preparação e impermeabilização do solo, cobertura diária e montagem de drenos para captação e queima de gases.
Capacidade de processamento	Médio: O tratamento dos resíduos depende da disponibilidade da área para montagem das leiras que permanecem até 60 dias no local, a capacidade de processamento é afetada diretamente pela área do empreendimento.	Alto: Tem capacidade para receber grandes quantidades de resíduos diariamente, porém o volume recebido afeta a vida útil dos aterros.
Eficiência na proteção contra a emissão de GEE	Alta: Não há necessidade de implementação de tecnologias extras devido há não geração de CH ₄ e N ₂ O no processo de decomposição aeróbico.	Baixa: Necessita de drenagem de gases contínua que não atinge 100% dos gases gerados
Capacidade de valorização dos resíduos orgânicos	Alto: Ocorre a valorização dos resíduos ao transformá-los em adubo orgânico	Baixo: Os resíduos orgânicos são aterrados e seu potencial de valorização é desperdiçado.

Fonte: ABRELPE, 2019; RODRIGUES *et. al.*, 2019; KONG, 2012.

A compostagem oferece muitos benefícios além de menores emissões de GEE, que são o aproveitamento de subprodutos da compostagem (AWASTHI *et al.*, 2019). Como apresentado na Tabela 6, a compostagem se mostra mais vantajosa técnica e economicamente, pois é mais eficiente no tratamento da fração orgânica dos RSU, apresenta menor potencial poluidor, não apresenta restrição de tempo de vida útil do empreendimento e possui menores custos de implantação e operação (BARROS, 2012; SAER, 2013).

2. METODOLOGIA

A abordagem da pesquisa considerou os critérios da Metodologia Científica:

- I. Fase descritiva e exploratória – Neste momento exploraram-se informações sobre mudanças climáticas e efeito estufa, relacionando-os com a gestão de resíduos e compostagem, além das formas de inventariar as emissões de GEE no processo;
- II. Fase analítica – Nesta etapa foram levantados dados da quantidade de resíduos orgânicos tratados por meio de compostagem e estudados os fatores de emissão de Gases do Efeito Estufa - GEE com base no estudo caso escolhido para o cálculo das emissões de CH₄;
- III. Fase sintética e atuante – Consistiu nos cálculos das emissões de metano evitadas por meio da compostagem, entendimento das possibilidades e viabilidade aquisição de créditos de carbono a partir dos cálculos das emissões de CH₄ evitadas e desenvolvimento dos resultados e conclusões.

2.1. Construção do referencial teórico

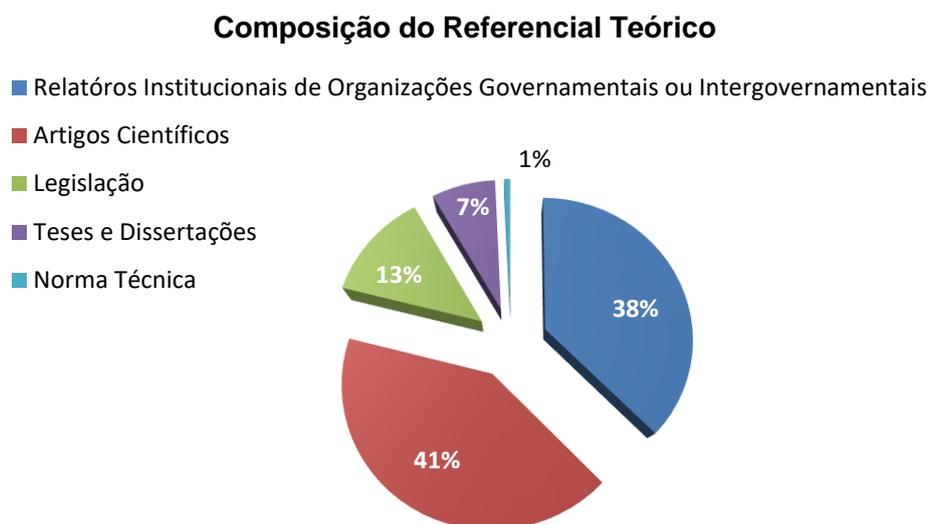
Para realização da fase descritiva e exploratória foi feito inicialmente o levantamento bibliográfico sobre a problemática das mudanças climáticas, do aquecimento global e da intensificação das emissões de GEE na atmosfera, relacionando-os com a gestão de resíduos sólidos orgânicos e a técnica de compostagem como forma de valorização da fração orgânica dos resíduos sólidos, bem como as emissões de CH₄ presentes no processo.

O referencial teórico foi construído através de consultas a artigos científicos, dissertações e teses obtidas em portais indexadores como o Portal

de Periódicos do CAPES, Scielo, *Science Direct* e Google acadêmico, buscando publicações dos últimos 10 anos com as palavras-chave: Compostagem, Gases do Efeito Estufa, Metano, Resíduos Orgânicos, Inventário de Gases do Efeito Estufa – GEE, Mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL e Créditos de Carbono.

Na Figura 11 apresenta-se o resultado da contribuição para pesquisa com base nos tipos de fontes utilizadas. Observa-se que o embasamento científico do trabalho buscou publicações relevantes sobre o tema e relatórios técnicos de institutos de pesquisa governamentais e intergovernamentais.

Figura 11 - Contribuição de trabalhos e fontes de informações na pesquisa.



Fonte: O autor, 2020.

2.2. Definição do Estudo de Caso

Após a revisão bibliográfica, iniciou-se a fase analítica, onde foram pesquisadas organizações que realizam compostagem de resíduos orgânicos de restos de alimentos dentro do Estado do Rio de Janeiro, além dos locais preferenciais de disposição destes resíduos na região.

O levantamento indicou duas empresas operando ativamente no Estado, diferindo em seus portes e público alvo. Já o local preferencial de destinação de resíduos sólidos orgânicos foi determinado com base no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município do Rio de Janeiro. O PMGIRS do Rio de Janeiro foi escolhido como base no fato da cidade abrigar a maior quantidade de clientes das empresas de compostagem e, conseqüentemente, a maior massa de resíduos coletados.

2.2.1. Empresa de Compostagem

Uma das empresas consultadas possui menor estrutura de operação, clientes e recursos humanos, e aqui denominada como “Empresa de Menor Porte”. Esta realiza a coleta dos resíduos orgânicos diretamente em domicílios para alguns bairros do município do Rio de Janeiro. O serviço é cobrado aos moradores que optam individualmente pelo tratamento de seus resíduos orgânicos. A operação teve início em 2015, apenas com a coleta feita em alguns bairros da zona sul da cidade por bicicletas e triciclos não motorizados. Atualmente as coletas do empreendimento abrangem também bairros do Centro e Zona Norte do município, porém ainda em menores proporções.

A segunda é uma empresa de “Maior Porte” e realiza compostagem dos resíduos orgânicos provenientes da coleta seletiva de grandes geradores de resíduos do Estado do Rio de Janeiro. A escolha por esta empresa como estudo de caso se deu pelo fato de ter clientes dos mais variados setores e possuir a melhor estrutura para compostagem do Estado, capaz de processar 1.500 toneladas de resíduos orgânicos por mês, além de disponibilizar dados de mais de 10 anos de atividade.

A operação de compostagem da empresa escolhida está localizada no município de Cachoeiras de Macacu, na região serrana do Estado e possui sede administrativa na cidade do Rio de Janeiro, além de ser a primeira empresa de compostagem licenciada pelo Instituto Estadual do Ambiente – INEA ainda em 2007. Na Figura 12 apresenta-se o mapa de localização da Empresa de Compostagem.

A empresa em questão opera em escala industrial utilizando o Sistema *Windrow* como a técnica de compostagem. A aeração ocorre de forma passiva realizada por revolvedores mecânicos (Figura 13).

Os resíduos tratados na empresa são transformados em composto orgânico para adubação em até 45 dias, e assim ocorre o ciclo orgânico completo, desde a coleta dos resíduos nos geradores realizada por caminhões, passando pelo processo de compostagem, produção de composto e chegando até o cultivo e comercialização de alimentos orgânicos pela própria empresa.

Figura 13 - Revolvedor mecânico em operação na empresa de compostagem.



Fonte: Empresa de Compostagem, 2020.

Os dados sobre a quantidade de resíduos orgânicos compostados foram obtidos através de contatos por *e-mail* com representantes da empresa de compostagem, os dados são apresentados na Tabela 7. Os valores se referem ao período de atividade da empresa de compostagem, que iniciou suas operações em 2007 até o fim 2019, quando foi divulgado o último balanço anual.

É possível notar uma evolução na quantidade de resíduos orgânicos tratados na empresa, principalmente a partir do ano de 2010, quando foi sancionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos, pois a partir deste momento houve maior procura pela melhor destinação e tratamento dos resíduos orgânicos impulsionados pela PNRS.

Tabela 7 - Quantidade de resíduos orgânicos compostados na empresa de compostagem.

Resíduos orgânicos compostados (restos de alimentos)	
Ano	W_{j,x} (Quantidade em toneladas)
2007	2.500,0
2008	3.110,0
2009	3.470,0
2010	4.010,0
2011	5.140,0
2012	5.220,0
2013	6.010,0
2014	6.580,0
2015	7.070,0
2016	7.430,0
2017	8.020,0
2018	9.303,0
2019	10.190,0
Total	78.053,0

Fonte: O autor, 2020.

Legenda: W_{j,x} = Quantidade orgânicos tratados.

2.2.2. Cenário atual para destinação de resíduos sólidos urbanos – CTR Santa Rosa em Seropédica (Linha de Base)

A construção do cenário de linha de base para destinação dos resíduos sólidos urbanos, ou seja, na ausência da operação da empresa de compostagem, se baseou nas informações apresentadas no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS do Município do Rio de Janeiro.

O PMGIRS indicou o Aterro Sanitário CTR Santa Rosa, ou CTR Seropédica, como também é conhecido, como principal destinação da fração orgânica dos RSU na cidade do Rio de Janeiro, onde está localizada a maior parte dos clientes da empresa de compostagem (RIO DE JANEIRO, 2015).

O CTR Seropédica iniciou suas atividades em janeiro de 2011 e possui todas as licenças ambientais necessárias. Localiza-se próximo ao município do

Rio de Janeiro na cidade de Seropédica, ocupando uma área de 1.699.512,97 m² (UNFCCC, 2012).

Operado pela iniciativa privada a CTR recebe os RSU dos municípios do Rio de Janeiro, Itaguaí e Seropédica, com expectativa inicial de recebimento superior a 6.000 toneladas por dia e foi projetado para drenar os gases do aterro com possibilidades de aproveitamento energético, distribuição de Biogás e obtenção de créditos de carbono por projetos de MDL (UNFCCC, 2012). Atualmente a CTR Seropédica recebe quantidade de resíduos superior a 10.000 toneladas por dia (CUNHA; RITTER; FERREIRA, 2020).

Além de ser o principal destino dos resíduos da região metropolitana do Estado, o CTR Seropédica está inserido no âmbito dos projetos de MDL como integrante do Programa de Atividades (PoA) “CDM PoA: Projeto de Gerenciamento de Resíduos Sólidos e de Carbon Finance da Caixa Econômica Federal” registrado em 05 de Outubro de 2012 e denominado “CPA-1: Recuperação do gás de Aterro, geração de energia e distribuição de biogás do CTR Santa Rosa” (UNFCCC, 2012).

O “*Clean Development Mechanism Program Activity Design Document Form (CDM-CPA-DD)*” em inglês, ou Documento de Concepção do CPA-DD REF.6573, apresenta os dados para determinação das emissões de CH₄ no CTR Seropédica e será referência para construção do cenário de linha de base das emissões de metano na ausência do projeto da empresa de compostagem (UNFCCC, 2012).

2.3. Cálculo das Reduções das Emissões de CH₄ e Créditos de Carbono

Já na etapa sintética, os dados de quantidade de resíduos orgânicos tratados na Empresa de Compostagem foram aplicados à metodologia MDL AMS-III.F - *Avoidance of methane emissions through composting --- Version 12.0* para cálculo das emissões de gases de efeito estufa – GEE, onde foram estimadas as emissões de CH₄ da CTR Seropédica para determinar as reduções de GEE alcançadas ao empregar a compostagem.

Este trabalho limitou-se a calcular apenas as emissões referentes ao metano, dessa forma não foram consideradas as emissões de N₂O na compostagem. O mesmo ocorre para as emissões provenientes do consumo de energia elétrica na compostagem e consumo de combustíveis fósseis. Entretanto é possível estimar suas emissões através da ferramenta CDM Tool AM13.

2.3.1. Metodologia MDL AMS-III.F - Avoidance of methane emissions through composting --- Version 12.0

O livro de metodologias MDL apresenta as possibilidades de aquisição de créditos de carbono através da compostagem, elas são indicadas na Tabela 8 (UNFCCC, 2019).

Dentre as alternativas, a que melhor se enquadra no projeto da empresa de compostagem é a metodologia AMS-III.F, pois está melhor dimensionada em função da escala reduzida de reduções de emissões de GEE e pela empresa coletar os resíduos seletivamente dos grandes geradores, ao contrário do que ocorre na ferramenta AMS-III.AF, que realiza a estimativa de emissões pela segregação ou recuperação dos resíduos orgânicos diretamente nos aterros sanitários.

Tabela 8 - Metodologias MDL aprovadas para compostagem.

Metodologia	Status	Escala
ACM022 – Processos alternativos de tratamento de resíduos.	Ativo	Grande escala
AMS-III.F – Prevenção das emissões de metano através da compostagem.	Ativo	Pequena escala
AMS-III.AF - Prevenção das emissões de metano através da escavação e compostagem de resíduos sólidos urbanos deteriorados (RSU).	Ativo	Pequena escala

Fonte: UNFCCC, 2019.

A *AMS-III.F.: Avoidance of methane emissions through composting --- Version 12.0* foi escolhida, pois está aprovada para projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL em pequena escala de reduções de GEE, que possibilita a obtenção de créditos de carbono através da compostagem, uma vez que, ao tratar os resíduos orgânicos, são evitadas as emissões de metano para a atmosfera que ocorreriam no cenário de linha de base, ou seja, caso estes resíduos fossem destinados ao aterro sanitário (UNFCCC, 2016).

A metodologia AMS-III.F consiste em medidas para evitar as emissões de metano para a atmosfera provenientes da biomassa ou outras matérias orgânicas, que seriam deixadas em decomposição anaeróbia em um local de disposição de resíduos sólidos (SWDS, em inglês), nesse contexto entendido como aterros sanitários (UNFCCC, 2016).

Ou seja, ao aplicar medidas para tratar os resíduos orgânicos com a compostagem ocorrem emissões de metano em menores quantidades, e desse modo, são reduzidas as emissões de CH₄ para atmosfera e gerados créditos de carbono como resultado (UNFCCC, 2016). Tal possibilidade pode ser explicada matematicamente seguindo a equação abaixo:

(1)

$$ER_y = BE_y - PE_y$$

Onde:

ER_y = Reduções de emissões de CH₄ no ano y (tCO₂eq/ano);

BE_y = Emissões de CH₄ na linha de base no ano y (tCO₂eq/ano);

PE_y = Emissões de CH₄ pelo projeto de compostagem no ano y (tCO₂eq/ano);

Desse modo, se faz necessário a construção do cenário das emissões de CH₄ na linha de base, ou seja, as emissões de metano que ocorreriam na ausência do projeto de compostagem, para posterior comparação com as emissões de metano geradas durante a atividade da empresa de compostagem e, assim estimar as reduções das emissões de GEE. A construção do cenário de linha de base para a metodologia *AMS-III.F* segue a Equação (2):

$$BE_y = BE_{CH_4, SWDS, y} + BE_{WW, y} + BE_{CH_4, manure, y} - MD_{y, reg} \times GWP_{CH_4} \quad (2)$$

Onde:

BE_y = Emissões de linha de base (tCO₂eq);

$BE_{CH_4, SWDS, y}$ = Emissões de metano durante o ano y com a destinação de resíduos orgânicos para aterros sanitários durante o período a partir do início da atividade do projeto de compostagem até o fim do ano y (tCH₄);

$BE_{WW, y}$ = Emissões da linha de base das águas residuais co-compostas durante ano y (tCH₄);

$BE_{CH_4, manure, y}$ = Emissões da linha de base de esterco compostado pelas atividades do projeto durante ano y (tCH₄);

$MD_{y, reg}$ = A quantidade de metano que teria sido destruído/queimado por obrigações legais durante o ano na ausência do projeto, em toneladas de metano durante ano y (tCH₄);

GWP_{CH_4} = Potencial de Aquecimento Global do CH₄.

A empresa utilizada como estudo de caso não realiza o tratamento de águas residuais e esterco animal, por esse motivo as variáveis “ $BE_{WW, y}$ ” e “ $BE_{CH_4, manure, y}$ ” foram consideradas nulas e receberam o valor zero (0).

Em relação ao termo $MD_{y, reg}$, a legislação brasileira estabelece que cada estado é responsável pelo processo de licença ambiental de aterros em seu território, assim, cada estado define as leis, padrões mínimos, tecnologias, restrições e requisitos ambientais para seus aterros sanitários (UNFCCC, 2012).

Para o caso do aterro sanitário CTR Santa Rosa (Seropédica), localizado no estado do Rio de Janeiro, a legislação brasileira de resíduos sólidos não exige que se instale nenhum sistema de coleta e queima de gases. Uma vez que não existem leis nem incentivos regulatórios para impor a captura ou queima de metano será atribuído o valor zero (0) ao termo $MD_{y, reg}$.

O potencial de aquecimento global – GWP foi definido conforme última atualização no Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas - IPCC, entretanto, na Equação 2 será desconsiderado, uma vez que as conversões de CH₄ para toneladas métricas de CO₂ equivalente ocorrerão no momento em que serão estimadas as emissões de GEE na linha de base e no processo de compostagem (IPCC, 2013).

O termo “ $BE_{CH_4,SWDS,y}$ ” representa as emissões de CH₄ oriundas da disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários, esse tipo de destinação de resíduos ainda é a mais utilizada para a fração orgânica dos resíduos no Brasil segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento e sua contribuição para a geração de metano foi estimada pela Equação (2) (BRASIL, 2019a).

Seguindo essas premissas, a construção do cenário de linha de base consistiu na estimativa das emissões de metano que seriam geradas na CTR Seropédica, caso os resíduos orgânicos não fossem tratados na empresa de compostagem, o que pode ser representada pela equação a seguir:

(3)

$$BE_y = BE_{CH_4,SWDS,y}$$

Onde:

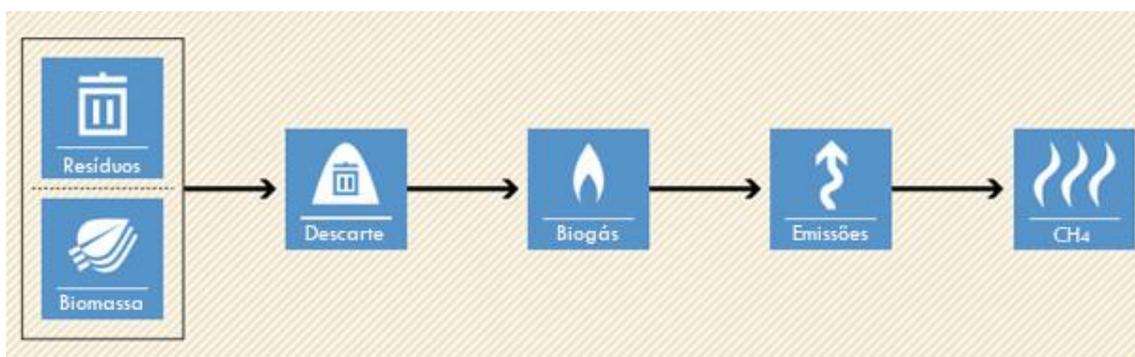
BE_y = Emissões de linha de base (tCO₂eq);

$BE_{CH_4,SWDS,y}$ = Emissões de metano durante o ano y com a destinação de resíduos orgânicos para aterros sanitários durante o período a partir do início da atividade do projeto de compostagem até o fim do ano y (tCH₄);

2.3.1.1 Emissões de CH₄ na CTR Seropédica - Linha de Base

O cálculo das emissões de linha de base consiste em estimar a quantidade de metano que seria gerada se os resíduos orgânicos coletados pela empresa de compostagem fossem destinados ao aterro sanitário CTR Seropédica e não compostados. Esta seria a linha de base do projeto como apresenta a Figura 14.

Figura 14 - Fluxo de gerenciamento de resíduos orgânicos e emissões de GEE na linha de base.



Fonte: UNFCCC, 2019.

Não foram realizadas medições no local da atividade do aterro sanitário para monitoramento das emissões de GEE, por esse motivo os cálculos utilizaram valores padronizados apresentados no documento de concepção do projeto do Aterro Sanitário de Seropédica “CPA-1: Recuperação do gás de Aterro, geração de energia e distribuição de biogás do CTR Santa Rosa”, que é a alternativa de destino dos resíduos sólidos orgânicos na região do estudo, bem como fatores de emissão padronizados da ferramenta CDM Tool AM04 *Methodological tool: Emissions From Solid Waste Disposal Sites – Version 08.0* e atualizados conforme orientação da UNFCCC e IPCC (UNFCCC, 2017b).

A ferramenta de cálculo utilizada para inventariar as emissões de CH₄ foi a *CDM Tool AM04 Methodological tool: Emissions From Solid Waste Disposal Sites – Version 08.0*, que é a metodologia indicada para estimar a quantidade de metano gerada em aterros sanitários ou locais de disposição de resíduos sólidos (SWDS, em Inglês) para projetos MDL em sua versão mais recente (UNFCCC, 2017b).

A escolha pela CDM Tool AM04 se deu pela exigência de aplicação desta ferramenta em projetos MDL que evitem a disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários e, conseqüentemente, evitam a geração de GEE nestes locais, como exemplo, cita-se a metodologia AMS-III.F utilizada neste trabalho ou a metodologia ACM0022, para projetos de grande escala de redução de GEE (UNFCCC, 2017b). Com isso, a ferramenta possibilita determinar as

emissões de CH₄ que serão evitadas ao desviar estes resíduos para outras formas de tratamento, no caso deste trabalho, à compostagem.

Os cálculos do inventário de CH₄ em aterros sanitários (CDM Tool AM04) consistem em calcular as emissões de GEE ao contabilizar o metano que seria gerado ao depositar os resíduos sólidos em aterros sanitários, considerando a quantidade e composição dos RSU, clima local, qualidade operacional dos locais de disposição e cobertura do solo. Este cálculo é conhecido como modelo de decaimento em primeira ordem (SANTOS, ROMANEL, VAN ELK, 2017; UNFCCC, 2017b).

O metano capturado e encaminhado para queima por determinação regulatória ou legislação específica é descontado da quantidade de GEE emitida nos aterros (IPEA, 2018). A Equação 4 a seguir apresenta a fórmula para cálculo das emissões de CH₄ em aterros sanitários.

$$BE_{CH_4.SWDS,y} = \varphi \cdot (1 - f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-kj(y-x)} \cdot (1 - e^{-kj}) \quad (4)$$

Onde:

$BE_{CH_4,SWDS,y}$ = Emissões de metano durante o ano y com a destinação de resíduos orgânicos para aterros sanitários durante o período a partir do início da atividade do projeto de compostagem até o fim do ano y (tCH₄);

φ = Valor padrão para o fator de correção para contabilizar incertezas do modelo;

f = Fração de metano capturada no aterro sanitário e queimada em flare, incinerada ou usada de outra maneira.

GWP_{CH_4} = Potencial de Aquecimento Global do CH₄;

OX = Fator de oxidação, o qual reflete a quantidade de metano do aterro que é oxidado no solo ou em outro material que cobre o resíduo;

F = Fração de metano no gás de aterro (fração em volume);

DOC_i = Fração de carbono orgânico degradável (DOC) que pode decompor;

MCF = Fator de correção do metano;

DOC_j = Fração de carbono orgânico degradável (por massa) no lixo tipo j ;

K_j = Taxa de decaimento do lixo tipo j ;

$W_{j,x}$ = Quantidade de lixo orgânico tipo j despejado no aterro no ano x (toneladas);

X = Ano do início das atividades da empresa de compostagem (2007);

Y = Ano para o qual foram calculadas as emissões de metano considerando o tempo total para degradação de toda matéria orgânica depositada até o ano de 2019 (INÁCIO, 2010; VIANA, 2011; REICHERT, 2013).

Para fins de cálculo considerou-se apenas restos de alimentos como resíduos orgânicos, pois este é o tipo de resíduo tratado pela empresa de compostagem (vide Tabela 7). Com isso foram definidos os fatores de emissão considerando os dados apresentados no CDM-CPA-DD do CTR Seropédica que é a alternativa atual para a destinação dos resíduos sólidos orgânicos (RIO DE JANEIRO, 2015).

Na Tabela 9 são apresentados os fatores de emissões a serem introduzidos nas fórmulas de cálculo da Equação (4) de forma compilada. Assim, os dados, fatores de emissão e equações foram introduzidos em software de planilha eletrônica "*Microsoft Excel*" para realização dos cálculos e obtenção dos resultados.

Tabela 9 - Fatores aplicados à Equação (4).

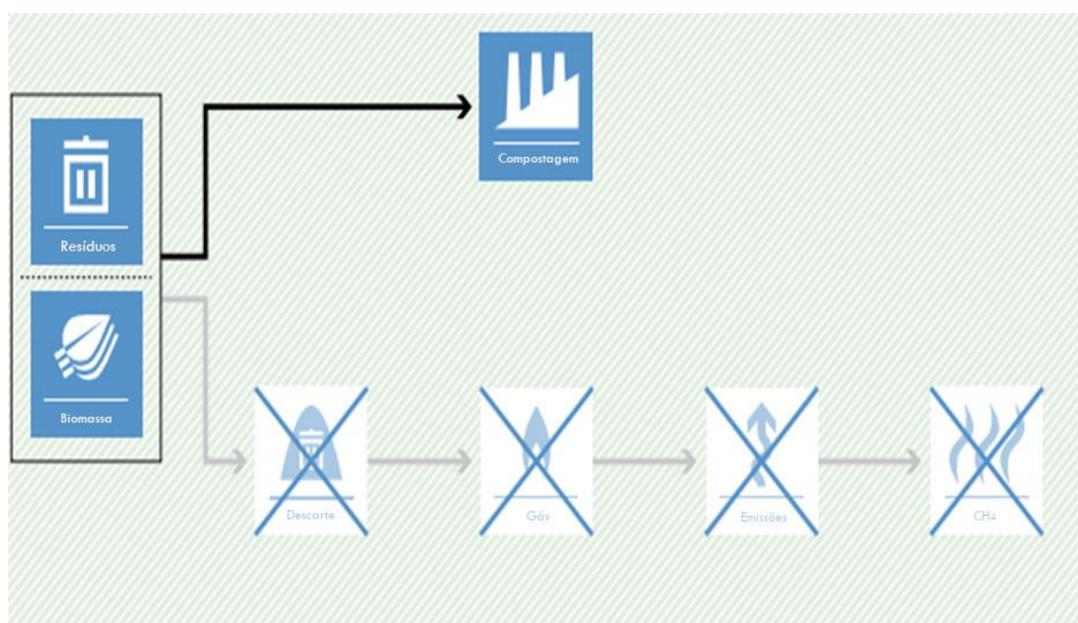
Parâmetro	Valor aplicado	Premissas	Fonte de dados
Φ	0,9	Valor padrão para o fator de correção para contabilizar incertezas do modelo.	(UNFCCC, 2012)
F	0,5	Selecionado o valor sobre a quantidade de gás de aterro capturada no CTR Seropédica informada no CDM-CPA-DD do projeto MDL.	(UNFCCC, 2012)
GWP_{CH_4}	28	Potencial de Aquecimento Global do CH_4 atualizado pela UNFCCC.	(IPCC, 2013)
OX	0.1	Fator de oxidação, o qual reflete a quantidade de metano do aterro que é oxidado no solo ou em outro material que cobre o resíduo.	(UNFCCC, 2012)
F	0,5	Fração de metano no gás de aterro do CTR Seropédica informada no CDM-CPA-DD do projeto MDL (fração em volume).	(UNFCCC, 2012)
DOC_r	0,5	Fração de carbono orgânico degradável (DOC) que pode decompor.	(UNFCCC, 2012)
MCF	1,0	Foi considerado o fator de correção do metano para aterros sanitários anaeróbicos.	(UNFCCC, 2012)
DOC_j	0,15	Considerou-se apenas os resíduos orgânicos de restos de alimentos para fins de cálculo.	(UNFCCC, 2012)
k_j	0,4	Levando em consideração o clima do Estado do Rio de Janeiro, utilizou-se a variável <i>Tropical and Wet</i> (Tropical e Úmido).	(UNFCCC, 2012)
X	2007	Início das atividades da empresa de compostagem.	Empresa de compostagem
Y	2031	Tempo necessário para degradação total da matéria orgânica no aterro sanitário.	(INÁCIO, 2010; VIANA, 2011; REICHERT, 2013)

Fonte: Adaptado de INÁCIO, 2010; IPCC, 2013; UNFCCC, 2012; 2017b.

2.3.1.2. Emissões de CH₄ com a compostagem – Adicionalidade

A adicionalidade nesse contexto consiste em mensurar as emissões de CH₄ que são evitadas com a aplicação da compostagem para tratamento dos resíduos sólidos orgânicos, evitando assim a geração de grandes quantidades deste GEE para a atmosfera, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Fluxo de gerenciamento de resíduos orgânicos e emissões de GEE no cenário do projeto de compostagem.



Fonte: UNFCCC, 2019.

A ferramenta que possibilita inventariar as emissões de GEE provenientes da compostagem exigida pela metodologia AMS-III.F é a CDM Tool *Methodological tool AM013: Project and leakage emissions from composting – Version 02.0* (UNFCCC, 2017a).

Não foram realizadas medições para monitoramento das emissões de GEE pela compostagem *In Loco*, por esse motivo os cálculos foram feitos utilizando valores padronizados apresentados na ferramenta de cálculo CDM Tool AM013 (UNFCCC, 2017a). Seguindo a Equação (5):

$$PE_{COMP_y} = PE_{EC_y} + PE_{FC_y} + PE_{CH_4_y} + PE_{N_2O_y} + PE_{RO_y} \quad (5)$$

Onde:

PE_{COMP_y} = Emissões associadas ao projeto de compostagem no ano y (tCO₂eq/yr);

PE_{EC_y} = Emissões associadas ao consumo de eletricidade no projeto de compostagem no ano y (tCO₂eq/yr);

PE_{FC_y} = Emissões associadas ao consumo de combustíveis fósseis no projeto de compostagem no ano y (tCO₂eq/yr);

$PE_{CH_4_y}$ = Emissões de metano no projeto de compostagem no ano y (tCO₂eq/yr);

$PE_{N_2O_y}$ = Emissões de óxido nitroso no projeto de compostagem no ano y (tCO₂eq/yr);

PE_{RO_y} = Emissões de metano pelo escoamento de efluentes sanitários no ano y (tCO₂eq/yr).

O termo PE_{RO_y} não foi considerado para cálculo das emissões de GEE uma vez que a empresa de compostagem em questão não realiza o tratamento de efluentes sanitários em seu processo.

Já as variáveis PE_{EC_y} , PE_{FC_y} e $PE_{N_2O_y}$ foram desconsideradas, para que sejam comparadas apenas as emissões de CH₄ entre o processo de compostagem e as emissões de metano no aterro sanitário (linha de base). Desse modo é possível reduzir a Equação 5 à $PE_{COMP} = PE_{CH_4}$.

Seguindo a ferramenta *CDM Tool AM 013*, as emissões de CH₄ no processo de compostagem podem ser estimadas ao encontrar os resultados para o termo PE_{CH_4} através Equação 6, a seguir.

$$PE_{CH_4_y} = Q_y \cdot EF_{CH_4_y} \cdot GWP_{CH_4} \quad (6)$$

Onde:

$PE_{CH_4_y}$ = Emissões de metano pelo projeto de compostagem no ano y (tCO₂eq/yr);

Q_y = Quantidade de resíduos compostados (t/yr);

EF_{CH_4y} = Fator de emissão de metano (CH₄) por tonelada de resíduo compostado no ano y (tCO₂eq/yr);

GWP_{CH_4} = Potencial de aquecimento global do metano (CH₄) (tCO₂/tCH₄).

Na Tabela 10 apresenta-se os fatores de emissões a serem introduzidos nas fórmulas de cálculo da equação (6). Assim os dados, fatores de emissão e equações foram introduzidos em software de planilha eletrônica “Excel” para realização dos cálculos e obtenção dos resultados.

Tabela 10 - Fatores aplicados à Equação (6).

Parâmetro	Valor aplicado	Premissas	Fonte de dados
Q_y	Conforme tabela 12	Quantidade de resíduos tratados pela empresa de compostagem.	Empresa de compostagem
EF_{CH_4y}	0,002	Fator de emissão <i>default</i> para o metano na compostagem (tCH ₄ /t de resíduos).	(UNFCCC, 2017)
GWP_{CH_4}	28	Potencial de Aquecimento Global do CH ₄ atualizado pelo IPCC no AR5.	(IPCC, 2013)

Fonte: Adaptado de UNFCCC,2017a; IPCC, 2013.

A ferramenta CDM Tool AM013 utiliza valores conservadores para os fatores de emissão quando não há como garantir a eficiência do processo de compostagem, recomenda-se, então, que sejam realizadas campanhas de monitoramento para criação de fatores de emissão de CH₄ específicos para o projeto, e assim é possível encontrar menores emissões no processo de compostagem, como indicado pelo referencial teórico deste trabalho.

2.3.1.3 Reduções de emissões de CH₄ e Créditos de Carbono com a compostagem

As quantidades relativas a reduções de emissões de GEE atribuídas a uma atividade de projeto MDL resultam em Reduções Certificadas de Emissões (RCE) comercializadas no mercado de carbono.

De posse dos resultados dos cálculos das emissões na linha de base (CTR Seropédica) e das emissões do processo de compostagem é possível encontrar as reduções de emissões de metano com a aplicação da compostagem para tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Através da equação 7 foi obtida a quantidade de CH₄ evitada ao utilizar compostagem para tratamento dos resíduos orgânicos, este também será o valor das reduções de GEE para obtenção dos créditos de carbono (RCE).

$$RCE_y = BE_y - PE_y \quad (7)$$

Onde:

RCE_y = Reduções Certificadas de emissões de CH₄ no ano y (tCO₂eq/yr);

BE_y = Emissões de CH₄ na linha de base no ano y (tCO₂eq/yr);

PE = Emissões de CH₄ pelo projeto de compostagem no ano y (tCO₂eq/yr);

Por fim, a quantidade de emissões de CH₄ evitadas pela compostagem são multiplicados pelos valores de preços históricos das cotações dos Créditos de Carbono (RCE) no período de atividade da empresa de compostagem (tabela

3), e assim encontrados os valores que poderiam ser adquiridos caso fossem pleiteados os créditos de carbono, como indica a equação 8.

Para o período posterior à 2019 foi utilizado o valor da última cotação (€ 27,66) disponibilizada na plataforma para mercados financeiros *Investing.com* consultada em 01/07/2020.

$$\text{€RCE} = \text{€} \cdot \text{RCE} \quad (8)$$

Onde:

€RCE = Valor obtido com RCE no ano y;

€ = Valor dos RCE em Euros no ano y;

RCE = Emissões de CH₄ evitadas no ano y.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos inventários de emissões de GEE realizados para a linha de base com referência ao CTR Seropédica, usando como fonte de dados os padrões de emissão usados no CDM-CPA-DD do projeto MDL. Bem como são relatadas as emissões de CH₄ provenientes da empresa de compostagem, as reduções das emissões de metano e potencial de aquisição de receitas com créditos de carbono. O perfil traçado aponta grande redução das emissões de CH₄ ao utilizar a técnica de compostagem no estudo de caso investigado, porém ainda apresenta margem para maiores reduções.

3.1. Inventários das emissões de CH₄ no CTR Seropédica – Linha de Base

O inventário das emissões de metano na linha de base chegou ao resultado de 26.433 toneladas de CO₂eq que seriam lançadas para a atmosfera caso os resíduos orgânicos tratados na empresa de compostagem fossem destinados ao aterro sanitário CTR Seropédica. São apresentadas na Tabela 11 as emissões de CH₄ em tCO₂eq no cenário de linha de base.

Os resultados encontrados a partir do ano de 2020 se referem às emissões de metano que ocorrem ao longo dos anos em decorrência da decomposição gradual da matéria orgânica em condições anaeróbias. Ou seja, mesmo após a interrupção da disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários ainda ocorre a geração de CH₄, o que no contexto deste trabalho representou a geração de 5.692,073 tCO₂eq (VIANA, 2011; REICHERT, 2013). Na Figura 16 apresenta-se a curva da geração de GEE na CTR Seropédica utilizando o modelo de decaimento em primeira ordem.

Tabela 11 - Emissões de CH₄ no cenário de linha de base.

Ano	W _{j,x} (toneladas)	BECH ₄ ,SWDS _y (tCO ₂ eq)
2007	2.500,000	467,282
2008	3.110,000	856,954
2009	3.470,000	1.148,408
2010	4.010,000	1.374,187
2011	5.140,000	1.568,187
2012	5.220,000	1.700,259
2013	6.010,000	1.802,192
2014	6.580,000	1.877,003
2015	7.070,000	1.930,887
2016	7.430,000	1.968,848
2017	8.020,000	1.996,315
2018	9.303,000	2.017,673
2019	10.190,000	2.033,356
2020	0,000	1.566,074
2021	0,000	1.176,401
2022	0,000	884,948
2023	0,000	659,169
2024	0,000	465,168
2025	0,000	333,096
2026	0,000	231,163
2027	0,000	156,352
2028	0,000	102,468
2029	0,000	64,508
2030	0,000	37,041
2031	0,000	15,683
Total	78.053,000	26.433,624

Fonte: O autor, 2020.

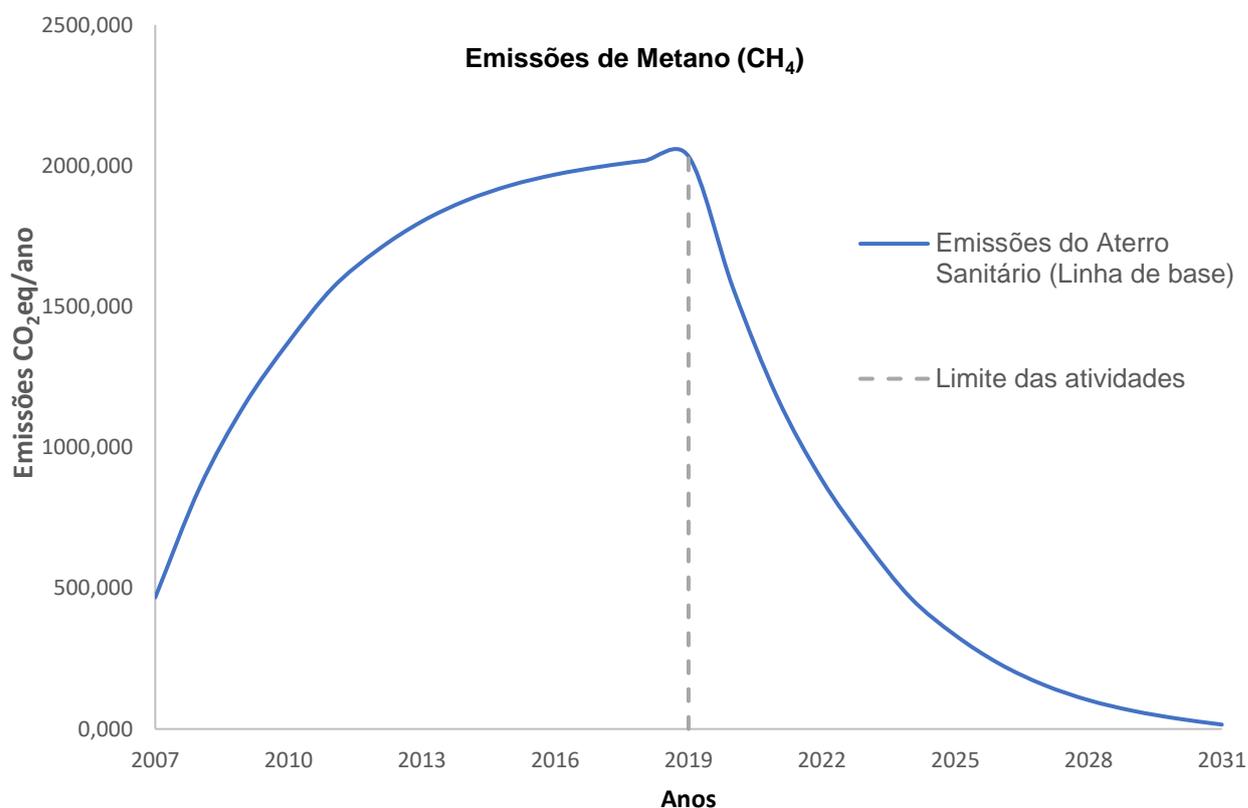
Legenda: W_{j,x} = Quantidade de resíduos orgânicos.

BECH₄,SWDS_y = Emissões de metano no aterro sanitário (linha de base)

É possível observar na Figura 16 uma intensa geração de gases no aterro com uma rápida crescente nas emissões de metano nos primeiros anos de atividade, que pode ser explicado pelo contínuo recebimento de resíduos para aterramento somado ao tempo demandado para a degradação da matéria orgânica (VIANA, 2011).

Após o encerramento da disposição dos resíduos, delimitado pela linha tracejada, ocorre o decréscimo das emissões de metano enquanto a matéria orgânica recalcitrante é decomposta lentamente, como exemplificado na Figura 15.

Figura 16 - Emissões de CH₄ no cenário de linha de base.



Fonte: O autor, 2020.

Os resultados indicam que em média são gerados 338 kg de CO₂eq para cada tonelada de resíduos orgânicos destinadas ao aterro sanitário CTR Seropédica.

3.2 Inventário das emissões de CH₄ com o uso da compostagem

O cálculo das emissões de metano geradas na compostagem feito com a ferramenta CDM Tool AM013 chegou ao resultado de 4.370,97 toneladas métricas de carbono equivalente nos treze anos de atividade da empresa de compostagem. Na Tabela 12 são apresentadas as quantidades de GEE emitidos ao longo dos anos de operação da empresa de compostagem.

Tabela 12 - Emissões de CH₄ pela compostagem.

Ano	W_{j,x} (toneladas)	PECOMP_y (tCO₂eq)
2007	2.500,000	140,00
2008	3.110,000	174,16
2009	3.470,000	194,32
2010	4.010,000	224,56
2011	5.140,000	287,84
2012	5.220,000	292,32
2013	6.010,000	336,56
2014	6.580,000	368,48
2015	7.070,000	395,92
2016	7.430,000	416,08
2017	8.020,000	449,12
2018	9.303,000	520,97
2019	10.190,000	570,64
Total	78.053,000	4.370,97

Fonte: O autor, 2020.

Legenda: PECOMP_y = Emissões do projeto de compostagem.

W_{j,x} = Quantidade de resíduos orgânicos.

O aumento das emissões se deu pelo desenvolvimento e crescimento da empresa de compostagem, que aumentou sua abrangência de coleta e capacidade para suportar maior número de clientes (grandes geradores de resíduos) e conseqüentemente quantidade de resíduos.

Os resultados apontaram que a cada tonelada de resíduos orgânicos compostados são gerados apenas 56 kg de metano em CO₂ equivalente, valor seis vezes inferior às emissões de metano em aterros sanitários por tonelada de resíduos orgânicos.

Este valor poderia ser ainda menor caso fosse utilizado o fator de emissão desenvolvido por Inácio (2010), que encontrou o resultado de 33,6 kg CH₄ em CO₂ equivalente para cada tonelada de resíduos orgânicos compostados.

A comparação entre fator de emissão desenvolvido em Inácio (2010) e o *default* da ferramenta CDM Tool AM013, 1,2 e 2 kg.Mg⁻¹ respectivamente, aponta a importância da criação e aprimoramento de fatores de emissão específicos para cada projeto de compostagem e assim alavancar os resultados e atingir maiores reduções nas emissões de GEE, uma vez que a UNFCCC adota fatores de emissão conservadores selecionados com base em estudos e medições publicados em fontes de alta qualidade (UNFCCC, 2017).

3.3. Resultados das reduções das emissões de metano e possibilidades de receitas com créditos de carbono pela compostagem.

3.3.1 Reduções de emissões de CH₄ com a compostagem

Segundo a metodologia AMS-III.F, com a realização da compostagem dos resíduos orgânicos evitou-se que 22.062 toneladas de CO₂ equivalente fossem lançadas na atmosfera ao realizar o tratamento da fração orgânica dos resíduos de grandes geradores de resíduos no estado do Rio de Janeiro, esse número corresponde a uma redução de 83,5% das emissões de CH₄ que seriam geradas em aterros sanitários. Na Tabela 13 são apresentadas as reduções das emissões ao longo dos anos de atividade da empresa de compostagem.

Ao analisar a Tabela 13 pode-se verificar que a partir do ano de 2020 não há geração de metano no processo de compostagem, enquanto ainda ocorre emissão de CH₄ no aterro sanitário, isso se dá primeiramente pela data limite determinada para a realização dos cálculos, ano 2019, conforme disponibilizado no último balanço da empresa de compostagem e assim definido como recorte do trabalho. Porém o principal motivo dessa diferença está no tempo necessário para degradação da matéria orgânica em condições aeróbia e anaeróbias e suas respectivas emissões de metano.

No momento do final do processo de compostagem encerram-se também as emissões de metano devido a degradação mais rápida em condições aeróbias. Enquanto mesmo com o fim da disposição dos resíduos em aterros

sanitários, a matéria orgânica recalcitrante continua a se decompor lentamente em condições anaeróbias, como no caso do CTR Santa Rosa.

Tabela 13 - Reduções de Emissões de CH₄.

Equação (7): RCEy = BEy – Pey					
Ano	Wj,x (Quantidade de resíduos em toneladas)	Emissões de CH₄ na Linha de Base (tCO₂eq)	Emissões de CH₄ na compostagem (tCO₂eq)	Reduções de emissões de CH₄ (tCO₂eq)	Reduções de emissões de CH₄ (%)
2007	2.500,0	467,282	140,000	327,282	70,040
2008	3.110,0	856,954	174,160	682,794	79,677
2009	3.470,0	1.148,408	194,320	954,088	83,079
2010	4.010,0	1.374,187	224,560	1.149,627	83,659
2011	5.140,0	1.568,187	287,840	1.280,347	81,645
2012	5.220,0	1.700,259	292,320	1.407,939	82,807
2013	6.010,0	1.802,192	336,560	1.465,632	81,325
2014	6.580,0	1.877,003	368,480	1.508,523	80,369
2015	7.070,0	1.930,887	395,920	1.534,967	79,495
2016	7.430,0	1.968,848	416,080	1.552,768	78,867
2017	8.020,0	1.996,315	449,120	1.547,195	77,503
2018	9.303,0	2.017,673	520,968	1.496,705	74,180
2019	10.190,0	2.033,356	570,640	1.462,716	71,936
2020	0,000	1.566,074	0,000	1.566,074	100,000
2021	0,000	1.176,401	0,000	1.176,401	100,000
2022	0,000	884,948	0,000	884,948	100,000
2023	0,000	659,169	0,000	659,169	100,000
2024	0,000	465,168	0,000	465,168	100,000
2025	0,000	333,096	0,000	333,096	100,000
2026	0,000	231,163	0,000	231,163	100,000
2027	0,000	156,352	0,000	156,352	100,000
2028	0,000	102,468	0,000	102,468	100,000
2029	0,000	64,508	0,000	64,508	100,000
2030	0,000	37,041	0,000	37,041	100,000
2031	0,000	15,683	0,000	15,683	100,000
Total	78.053,000	26.443,624	4370,968	22.062,656	83,464

Fonte: O autor, 2020.

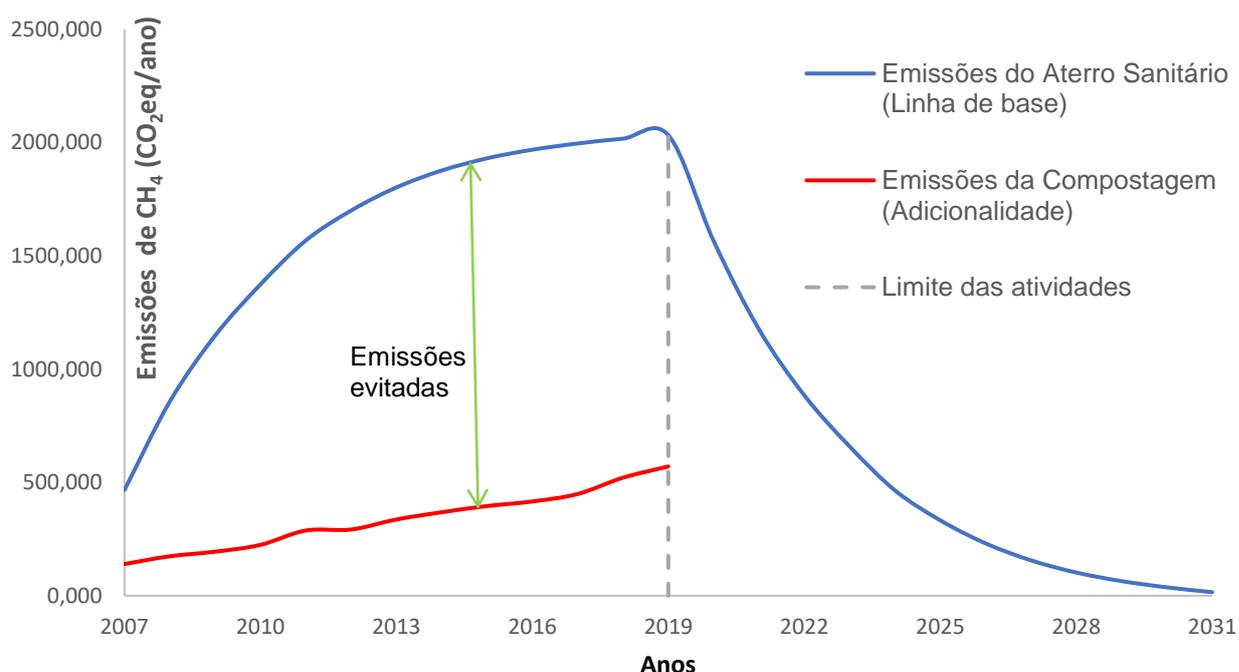
A partir da Tabela 13 é possível notar uma variação nos percentuais de redução das emissões ao longo dos anos, isso ocorre devido ao longo tempo necessário para decomposição total dos resíduos orgânicos em aterros

sanitários e suas emissões de CH_4 que ocorrem proporcionalmente (INÁCIO, 2010; VIANA, 2011).

Dessa forma, conforme são depositados mais resíduos no aterro, as emissões de metano da matéria orgânica ali presente se somam às emissões ocasionadas pela disposição de mais resíduos.

Os resultados indicam que em média, para cada tonelada de resíduos orgânicos que deixam de ser aterrados para serem tratados com compostagem são evitados que 283 kg de CH_4 em CO_2eq sejam lançados para a atmosfera. Na Figura 17 são apresentadas as emissões de GEE que seriam geradas no CTR Seropédica, as emissões geradas durante o processo de compostagem e as reduções das emissões ao longo do tempo.

Figura 17 - Reduções de emissões de metano pela compostagem.



Fonte: O autor, 2020.

É possível verificar a partir da Figura 17 que as emissões de GEE nos aterros sanitários evoluem com forte comportamento ascendente enquanto os resíduos orgânicos são introduzidos no aterro, já as emissões provenientes da compostagem crescem de maneira linear, variando apenas pelo aumento da

quantidade de resíduos orgânicos compostados. Ou seja, o impacto das reduções de CH₄ se multiplica conforme aumenta a quantidade de resíduos orgânicos desviados dos aterros sanitários para tratamento com compostagem.

Cabe ressaltar que as emissões de metano provenientes da compostagem encontradas poderiam ser ainda menores, uma vez que o fator de emissão *default* (2 kg.Mg⁻¹) definido na ferramenta de cálculo para obtenção de créditos de carbono através compostagem em projetos MDL é conservador (UNFCCC, 2017). Assim, ao aplicar fatores de emissão específicos disponíveis na literatura como o desenvolvido por Inácio (2010) para compostagem (1,2 kg.Mg⁻¹), a redução de CH₄ total atingiria 90%. Entretanto, as ferramentas de cálculo indicam que quando não ocorrem campanhas de medição no local de atividade devem ser utilizados os fatores de emissão definidos na própria ferramenta (UNFCCC, 2017).

Desse modo, é possível identificar que mesmo com pequenas alterações e variações nos valores e parâmetros das fórmulas utilizadas podem ser gerados impactos significativos nos resultados. Dessa forma, sempre que possível deve ser estimulada a utilização de dados primários e números reais monitorados em condições mais próximas da realidade (VIANA, 2011).

Contudo, mesmo quando os resíduos orgânicos são destinados corretamente para aterros sanitários com captação, tratamento e aproveitamento do biogás gerado, ainda ocorre o lançamento de grandes quantidades do gás metano para a atmosfera através da camada de cobertura.

Nesse sentido, os resultados obtidos demonstram que o desenvolvimento da compostagem como forma principal de disposição final dos resíduos orgânicos é primordial para uma gestão de resíduos de baixo carbono e o alcance das metas globais de reduções de emissões de GEE, e, sobretudo para o sucesso das estratégias de contenção do aquecimento global.

3.3.2 Possibilidades de receitas com créditos de carbono através da compostagem

Quanto às possibilidades de aquisição de receitas com créditos de carbono, os resultados estimaram valores superiores a 358.000,00 Euros, moeda utilizada nas transações do mercado de carbono no mercado europeu. Na Tabela 14 são apresentadas as possíveis receitas com créditos de carbono caso fossem pleiteados os RCE ao longo da atividade da empresa de compostagem.

Tabela 14 - Possibilidades de receitas com créditos de carbono.

Equação (8): €RCE = € x RCE			
Ano	Preço do RCE (EURO- €)	RCE (tCO₂eq)	€ x RCE
Dez/07	22,41	327,282	7.334,39
Dez/08	15,45	682,794	10.549,17
Dez/09	12,31	954,088	11.744,82
Dez/10	18,16	1.149,63	20.877,23
Dez/11	9,92	1.280,35	12.701,04
Dez/12	7,69	1.407,94	10.827,05
Dez/13	5,33	1.465,63	7.811,82
Dez/14	7,48	1.508,52	11.283,75
Dez/15	8,29	1.534,97	12.724,88
Dez/16	6,57	1.552,77	10.201,69
Dez/17	8,18	1.547,20	12.656,06
Dez/18	24,67	1.496,71	36.923,71
Dez/19	24,51	1.462,72	35.851,17
Dez/20	27,66	1.566,07	43.317,61
Dez/21	27,66	1.176,40	32.539,25
Dez/22	27,66	884,948	24.477,66
Dez/23	27,66	659,169	18.232,61
Dez/24	27,66	465,168	12.866,55
Dez/25	27,66	333,096	9.213,44
Dez/26	27,66	231,163	6.393,97
Dez/27	27,66	156,352	4.324,70
Dez/28	27,66	102,468	2.834,26
Dez/29	27,66	64,508	1.784,29
Dez/30	27,66	37,041	1.024,55
Dez/31	27,66	15,683	433,79
Total		22.062,66	358.929,45

Fonte: O autor, 2020.

Legenda: RCE = Reduções Certificadas de Emissões.

Os valores representam em média € 14 mil anuais, que poderiam ser utilizados para aquisição de equipamentos, melhoria de infraestrutura, veículos e recursos humanos com o objetivo de impulsionar a operação da empresa de compostagem. Assim possibilitaria maior alcance de clientes e maior quantidade de resíduos orgânicos coletados e tratados, o que estimularia ainda mais reduções de emissões de GEE e conseqüentemente proporcionaria mais receitas com créditos de carbono, além de uma gestão de resíduos mais sustentável.

Neste cenário onde se obteve € 359 mil em RCE ao compostar 78 mil toneladas de resíduos orgânicos, é possível estimar uma receita de € 4,60 por tonelada de resíduo tratado através dos RCEs, que somados às receitas iniciais com a coleta e tratamento dos resíduos, bem como com as vendas do composto produzido, pode significar tanto uma elevação nos lucros da empresa, quanto uma vantagem competitiva frente a outros meios de destinação de resíduos, como os aterros sanitários, que cobram valores inferiores para recebimento de resíduos, por exemplo.

Os resultados permitem explorar margens de lucro superiores ao considerar operações em maiores proporções, como para atendimento de populações de municípios do interior do Estado do Rio de Janeiro. Entretanto é necessário que a coleta seja realizada seletivamente, o que necessita do desenvolvimento de projetos contínuos de educação ambiental.

Neste sentido, cabe ressaltar que um conjunto de projetos de compostagem de pequena escala, ou Programas de Atividades – PoA, pode viabilizar o potencial de obtenção de receitas com créditos de carbono e superar as barreiras dos elevados custos de transação e processos de registro do projeto MDL.

A aplicação das metodologias MDL permite que projetos de compostagem sejam desenvolvidos considerando receitas superiores ao considerar os créditos de carbono, o que pode viabilizar os empreendimentos em pequena escala e de forma descentralizada, que na ausência de mecanismos de crédito e incentivos governamentais seriam impossibilitados. Dessa forma é possível aprimorar o gerenciamento de resíduos, evitando maiores impactos ambientais com a

disposição inadequada dos resíduos e promover a valorização dos resíduos orgânicos.

De acordo com Santos, Romanel, Van Elk (2017), existe uma tendência de fortalecimento do mercado de carbono com a entrada em vigor do Acordo de Paris, que amplia o MDL com objetivos conjuntos e sem restrição de grupos de partes, possibilitando a livre negociação entre diversos atores através do Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável - MDS pode representar uma vantagem competitiva para estes empreendimentos.

CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E ESTUDOS FUTUROS.

Conclusões

O presente trabalho realizou um estudo de caso sobre as reduções de emissões de CH₄ e possibilidades de aquisição de créditos de carbono em uma empresa que realiza a coleta seguida do tratamento de resíduos orgânicos de grandes geradores de resíduos por meio de compostagem. Para tal foi aplicada a metodologia de MDL AMS-III.F. e suas respectivas ferramentas para calcular as emissões no cenário de linha de base, bem como a contribuição adicional da empresa de compostagem na redução das emissões de GEE e seus RCEs.

A metodologia aplicada na pesquisa permitiu o cálculo das reduções de emissões. O fato de a metodologia AMS-III.F. abordar projetos de pequena escala é benéfico tanto para a empresa de compostagem estudada, quanto para demais empreendimentos que vislumbrem o mercado de valorização de resíduos orgânicos, pois permite o pleito aos RCEs em projetos de compostagem descentralizados e de pequeno porte, contribuindo para maiores reduções de emissões de GEE e maiores receitas com os créditos de carbono, o que pode ser determinante para o sucesso destas iniciativas.

Através dos cálculos realizados nesta pesquisa identificou-se que ocorreria a emissão de metano na ordem de 26.433 toneladas de CO₂eq, caso as 78.053 toneladas de resíduos orgânicos tratados pela empresa de compostagem fossem destinadas ao aterro sanitário CTR Santa Rosa em Seropédica. Para cada tonelada de resíduos orgânicos destinada ao aterro sanitário seriam gerados 338 kg de CO₂eq de metano, este valor é seis vezes superior às emissões ocorridas pelo processo de compostagem.

Foram encontrados resultados promissores quanto às reduções das emissões de metano através da compostagem, alcançando 83% de redução de GEE frente ao CTR Santa Rosa, ou ainda uma redução de 283 kg CO₂eq por tonelada de resíduos compostado.

A pesquisa possibilitou estimar as receitas com os créditos de carbono para projetos de compostagem e assim basear a tomada de decisão por gestores públicos ou investidores de forma segura, contribuindo com projetos futuros. Assim, baseando-se no presente estudo as receitas obtidas seriam de € 359 mil em RCE ao compostar 78 mil toneladas de resíduos orgânicos.

Porém, para o cálculo das receitas encontradas com os créditos de carbono não foram considerados os custos relacionados às taxas e demais investimentos necessários no processo de creditação e validação dos processos da empresa de compostagem, cabe ressaltar que estes representam investimentos consideráveis e devem ser analisados previamente.

Nesse contexto, as reduções das emissões de metano no setor de resíduos sólidos urbanos tem papel fundamental para o sucesso das estratégias globais para conter o avanço das mudanças climáticas e do aquecimento global, nesse sentido, a adoção da compostagem como prática de tratamento dos resíduos orgânicos apresenta resultados promissores e deve ser foco das ações do gerenciamento de resíduos nos municípios.

Novos modelos de negócios circulares com soluções tecnológicas que buscam a valorização dos resíduos orgânicos são essenciais para o sucesso das políticas públicas no setor de resíduos, dessa forma devem haver incentivos a estes empreendimentos, assim como determina a PNRS, pois estes prestam um serviço ambiental ao evitar os impactos ambientais referentes às emissões de CH₄ e geração de lixiviado que ocorreriam caso os resíduos orgânicos não fossem tratados corretamente.

Entretanto é necessário expandir as ações de compostagem para atingir maiores resultados. Dessa forma é recomendado desenvolver pesquisas para viabilizar projetos de compostagem com possibilidades de aquisição de créditos de carbono em escalas suficientes para atender maior parcela da população.

Ao considerar as estratégias e metas governamentais que determinam o aumento da parcela de resíduos orgânicos desviados dos aterros sanitários para valorização através de compostagem, é possível prever o desenvolvimento e crescimento deste mercado em longo prazo. Assim, ter estrutura e métodos que permitam acesso ao pleito de receitas com créditos de carbono pode representar

o sucesso destes empreendimentos, tanto em relação ao seu posicionamento no mercado quanto em função da sua imagem institucional.

Dessa forma, a aplicabilidade deste trabalho contribui como base científica para auxiliar a tomada de decisão e efetividade de demais projetos de compostagem, possibilitando maiores reduções de emissões de GEE em longo prazo e adequação às perspectivas futuras de desenvolvimento do mercado de carbono.

Limitações e Perspectivas Futuras

Não foram realizadas campanhas de monitoramento durante as atividades da empresa de compostagem, e por esse motivo a ferramenta CDM Tool AM13 considera emissões de CH₄ e N₂O de maneira conservadora em seus fatores de emissão padrão (*default*), contrariando as informações levantadas no referencial teórico, que indicam a ausência de metano e óxido nitroso no processo da compostagem.

Por esse motivo recomenda-se que sejam realizadas campanhas de medição e estudadas as emissões do projeto de compostagem a fim de construir um fator de emissão específico e assim possibilitar maiores reduções de GEE.

Dessa forma, como continuação desta pesquisa, sugere-se um estudo *in loco* para determinar os procedimentos ideais em todas as etapas de um empreendimento de compostagem, com a finalidade de garantir, melhor qualidade do composto e eficiência no tratamento.

O desenvolvimento e aplicação desse tipo de pesquisa permitirá definir faixas ótimas de aeração e manutenção dos teores de oxigênio e umidade através de procedimentos operacionais definidos, e ao estudar paralelamente a variação nas emissões de GEE durante as etapas da compostagem, será possível determinar um fator de emissão específico para projetos de compostagem em escala industrial, e dessa forma contribuir como base científica para novas iniciativas de compostagem que visem uma gestão de resíduos de baixo carbono.

REFERÊNCIAS

ANDERSEN, J. K. *et al.* Home composting as an alternative treatment option for organic household waste in Denmark: An environmental assessment using life cycle assessment-modelling. **Waste Management**, v. 32, n. 1, p. 31–40, 2012. doi:10.1016/j.wasman.2011.09.014. Acesso em: 13 abr. 2020.

ANDERSON, T.; HAWKINS, E.; JONES, P. 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. DOI: 10.1016/j.endeavour.2016.07.002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160932716300308>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

ANGELO, C.; RITTL, C. **Análise das Emissões de Brasileiros de Gases de Efeito Estufa e suas Implicações para as Metas do Brasil: 1970 – 2018**. São Paulo: Observatório do Clima, 2019. Relatório-Síntese. Disponível em: <http://www.observatoriodoclima.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC_SEEG_Relatorio_2019pdf.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. São Paulo: ABRELPE, 2012. 172 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 01 fev. 2020.

AWASTHI, S. K. *et al.* Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, [s.l.], p. 1-53, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122555>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852419317857#f0020>. Acesso em: 18 mar. 2020.

BAIRD, C.; CANN, M. **O efeito estufa: Emissões de energia pela Terra e o efeito estufa**. In: BAIRD, Colin; CANN, Michael. *Química Ambiental*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. Cap. 6. p. 231-233.

BARROS, R. T. V. **Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos**. Belo Horizonte: Tessitura, 2012.

BAYER, P. ; AKLIN, M. The European Union emissions trading system reduced CO₂ emissions despite low prices. **Proceedings of the National Academy of Sciences** . 2020, v. 117(16). p. 8804-8812.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1918128117>.

BECK-FRIIS, B. *et al.* 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 Nature.
<http://dx.doi.org/10.1023/a:1006245227491>.

BRASIL. Constituição (2009). **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2012**. Institui A Política Nacional Sobre Mudança do Clima – PNMC e dá Outras Providências. Brasília, DF, 30 dez. 2012. Disponível em:
<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm>.
Acesso em: 22 jan. 2020

BRASIL. **Decreto nº 6.263, de 21 de novembro de 2007**. Institui O Comitê Interministerial Sobre Mudança do Clima, Orienta A Elaboração do Plano Nacional Sobre Mudança do Clima, e Dá Outras Providências. Brasília, DF, 21 dez. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Decreto/D6263.htm. Acesso em: 22 jan. 2020.

BRASIL. **Lei nº12.305, 2 de agosto de 2010**. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei nº9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). **Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF: MCTI, III Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo protocolo de Montreal. Brasília, DF: MCTI, Relatórios técnicos de referência, versão para consulta pública, 2015.

BRASIL. Ministério das Relações Exteriores - Ponto Focal Nacional da UNFCCC. Departamento Para Sustentabilidade Ambiental Divisão da Mudança do Clima. **Brazil's third biennial update report to the united nations framework convention on climate change**. Brasília: Ministério das Relações Exteriores – Ponto Focal Nacional da Unfccc, 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018**. Brasília: MDR. SNS, 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). **Plano Setorial de Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação**. Brasília, 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Política Nacional sobre Mudança do Clima**. Disponível em: <<https://mma.gov.br/pol%C3%ADtica-sobre-mudan%C3%A7a-do-clima>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

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, 2017.

CANEJO, C. E.; RITTER, E.; FERREIRA, J. A. O uso de indicadores de desempenho na avaliação da qualidade operacional dos aterros sanitários do estado do Rio de Janeiro no triênio 2013-2015. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 25, n. 2, p. 345-360, mar. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020187467>.

CARBON Emissions Historical Data. **Investing.com**, 2020. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>>. Acesso em: 29 mar. 2020.

CIRCLE ECONOMY. **Circularity Gap Report**. 2018. <Disponível em: <https://www.circle-economy.com/insights/the-circularity-gap-report-our-world-is-only-9-circular>>. Acesso em: 06 fev. 2020.

COMISSÃO INTERMINISTERIAL DE MUDANÇAS GLOBAIS DE CLIMA (CIMGC). **Status dos projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil**. Brasília: Comissão Interministerial de Mudanças Globais de Clima (CIMGC), 2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). (2012). **Decisão de Diretoria nº 254, de 28 de agosto de 2012**. Dispõe Sobre Os Critérios Para an Elaboração do Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Estado de São Paulo e Dá Outras Providências. São Paulo, SP. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-empreendimentos/decisao-de-diretoria/decisao-de-diretoria-no-2542012vi-de-22-8-2012/>>. Acesso em: 22 jan. 2020.

DE GODOY, S. G. M. Projetos de redução de emissões de gases estufa: desempenho e custos de transação. **Revista de Administração**, [s.l.], p.310-326, 2013. Business Department, School of Economics, Business & Accounting USP. <http://dx.doi.org/10.5700/rausp1090>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0080210716304393>>. Acesso em: 23 jan. 2020.

DE GODOY, S. G. M.; SAES, M. S. M. Cap-and-trade and project-based framework: how do carbon markets work for greenhouse emissions reduction. **Ambiente & Sociedade**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.135-154, mar. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc795v1812015en>. Acesso em: 27 mar. 2020.

DUNNE, J. A.; JACKSON, S. C.; HARTE, J. Greenhouse Effect. **Encyclopedia of Biodiversity**, [s.l.], p.18-32, 2013. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-384719-5.00068-x>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012384719500068X>>. Acesso em: 08 fev. 2020.

ERMOLAEV, E.; SUNDBERG, C.; PELL, M.; JÖNSSON, H. Greenhouse gas emissions from home composting in practice. **Bioresource Technology**, v. 151, 174–182 p., 2014. doi:10.1016/j.biortech.2013.10.049..

FERREIRA, A. K. da C. *et al.* (2018). Composting of household organic waste and its effects on growth and mineral composition of cherry tomato. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 13, n. 3, p. 1-11. doi:10.4136/ambi-agua.2141.

FIRMO, A. L. B. *et al.* **Gestão de resíduos sólidos urbanos com baixas emissões de GEE**. Brasília: Ministério de Desenvolvimento Regional / PLANSAB, 2019. (Caderno Temático, v. 2). Disponível em: <[https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab/2-Caderno temático Gestão de RSU com baixas emissões de GEE.pdf](https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab/2-Caderno%20temático%20Gestão%20de%20RSU%20com%20baixas%20emissões%20de%20GEE.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2020.

FREITAS, L. M. C. **Análise de materiais estruturantes e de recipientes usados para a compostagem doméstica**. 2016. 94 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

Fundação Getúlio Vargas (FGV). **Registro Público de Emissões**: Programa Brasileiro GHG Protocol. 2018. (2019) Registro Público de Emissões - uma iniciativa do Centro de Estudos em Sustentabilidade (GVces) da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas (FGV EAESP). Disponível em: <<http://www.registropublicodeemissoes.com.br/participantes>>. Acesso em: 15 jul. 2020.

GONÇALVES, A. T. T. *et al.* Urban solid waste challenges in the BRICS countries: a systematic literature review. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.13, n. 2, p.1. 2018. doi:10.4136/ambi-agua.2157.

GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE (ICLEI, sigla em inglês). **Manual para aproveitamento do biogás**: Volume Um, Aterros Sanitários. São Paulo, 2009.

INÁCIO, C. de T. **Dinâmica de gases e emissões de metano na compostagem de resíduos orgânicos**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2010.

INÁCIO, C. de T. *et al.* Dinâmica de O₂, CO₂ e CH₄ em leiras estáticas de compostagem durante a fase termofílica. In: Congresso Brasileiro de Resíduos Orgânicos. **Anais...** Vitória: SBCS, 2009.

INÁCIO, C. de T.; BETTIO, D.B.; MILLER, P.R. Potencial de mitigação de emissões de metano via projetos de compostagem em pequena escala. In: Congresso Brasileiro de Resíduos Orgânicos. **Anais ...** Vitória: SBCS, 2009.

INÁCIO, C. de T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem: Ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Legado do MDL: impactos e lições aprendidas a partir da implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil**. Brasília: IPEA, 2018. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=34532>. Acesso em: 04 mar. 2020.

INSTITUTO DO ESTADO DO AMBIENTE (INEA). **Resolução nº 64, de 12 de dezembro de 2012**. Dispõe Sobre A Apresentação de Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa Para Fins de Licenciamento Ambiental no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2012. p. 1-4. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mda2/~e disp/inea_006665.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Japão: IGES. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. 2007. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>>. Acesso em: 28 mar. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas [Stocker, TF, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex e PM Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, NY, EUA, 2013. p.1535.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty** [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. 2018. In Press.

JÄCKEL, U.; THUMMES, K.; KÄMPFER, P. Thermophilic methane production and oxidation in compost. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 52, p. 175-184. 2005.

KONG, D. *et al.* Evaluating greenhouse gas impacts of organic waste management options using life cycle assessment. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 30, n. 8, p.800-812, 15 maio 2012. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x12440479>.

LIMA JUNIOR, R. G. S. *et al.* Avaliação de novas práticas de compostagem em pequena escala com aproveitamento energético. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 22, n. 2, p.361-370, 19 jan. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016159687>.

LOUREIRO, S.M.; ZVEIBIL, V.; DUBEUX, C.B.S. Cenários do Setor de Resíduos. In: LA ROVERE, E. L. *et al.*, 2015, Rio de Janeiro. **Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030**: Projeto - IES-Brasil, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2016. Disponível em: <http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/Noticias/documentos/ies-brasil-2030/13_tratamento-de-residuos.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2020.

MANIOS, T. *et al.* Methane and carbon dioxide emission in a two-phase olive oil mill sludge windrow pile during composting. **Waste Management**, [s.l.], v. 27, n. 9, p.1092-1098, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.05.012>.

MASSUKADO, L.M. *et al.* **Diagnóstico da Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**: Uma análise pós PNSB 2008 - ênfase na destinação final e nos resíduos orgânicos. Revista DAE, n. 192, p. 22-33, 2013.

MERSONI, C.; REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 863-875, Out. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522017000500863&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 07 dez. 2019.

MICHAELOWA, A. *et al.* **Sectoral implementation of nationally determined contributions (NDCs):** Circular economy and solid waste management. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329640472_Sectoral_implementation_of_nationally_determined_contributions_NDCs_circular_economy_and_solid_waste_management. Acesso em: 27 jan. 2020.

MINAS GERAIS. **Decreto nº 45.299, de 03 de dezembro de 2009.** Regulamenta Medidas do Poder Público do Estado de Minas Gerais Referentes Ao Combate Às Mudanças Climáticas e Gestão de Emissões de Gases de Efeito Estufa e dá Outras Providências. Belo Horizonte, MG, 04 dez. 2009. Diário do Executivo. 04/12/2009. p. 2_col1. Disponível em: Acesso em: 28 jan. 2020.

NASCIMENTO, B. L. M. **Compostagem de Lodo Séptico e Resíduos Agrícolas em Diferentes Sistemas de Aeração.** 2017. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Curso de Doutorado em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

OLIVEIRA, T. D.; GURGEL, A. C.; TONRY, S. International market mechanisms under the Paris Agreement: A cooperation between Brazil and Europe. **Energy Policy**, [s.l.], v. 129, p.397-409, jun. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519300539?via%3Dihub>. Acesso em: 18 fev. 2020.

PAIVA, D. S. *et al.* Mercado Voluntário de Carbono: Análises de Cobenefícios de Projetos Brasileiros. **Revista de Administração Contemporânea**, [s.l.], v. 19, n. 1, p.45-64, fev. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1982-7849rac20151240>.

PARANÁ. **Lei nº 17.133, de 25 de Abril de 2012.** Institui A Política Estadual Sobre Mudança do Clima. Curitiba, PR, 25 abr. 2012. Disponível em: <https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/pesquisarAto.do?action=exibir&codAto=67271&indice=1&totalRegistros=1&dt=4.2.2019.20.53.1.93>. Acesso em: 28 jan. 2020.

PETER-STANLEY, M.; GONZALEZ, G.; YIN, D. **Covering new ground:** State of the forest carbon markets 2013. 4th ed. Washington, DC: Ecosystem Marketplace, 2013. 101 p. Report. Disponível em: <http://www.forest-trends.org/documents/files/SOFCM-full-report.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2019.

REICHERT, G. A. **Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos:** o caso de Porto Alegre. 301 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

REICHERT, G. A.; MENDES, C. A. B. Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 3, p. 301–313, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522014000300301&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 30 jul. 2020.

RIO DE JANEIRO (RJ). Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) da Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2015.

RODRIGUES, C. A. de O. et. al. **Valorização de Resíduos Orgânicos**. Brasília: Ministério de Desenvolvimento Regional/PLANSAB, 2019. (Caderno Temático, v. 4). Disponível em: <https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab/4-CadernotematicoValorizacaoResiduosOrganicos.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2020.

SAER, A. *et al.* Life cycle assessment of a food waste composting system: environmental impact hotspots. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 52, p.234-244, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.022>.

SÁNCHEZ, A. *et al.* Greenhouse gas emissions from organic waste composting. **Environmental Chemistry Letters**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.223-238, 26 maio 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>.

SANTOS, M. M.; ROMANEL, C.; VAN ELK, A. G. H. P. Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 6, 1151–1162. 2017. doi:10.1590/s1413-41522017156311.

SEEG. Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 2017. Disponível em: <<http://www.seeg.eco.br>>. Acesso em: 15 jul. 2020.

SILVA, C. H. C. da; ROCHA, F. C.; SILVA, L. L. G. G. da. Production of organic compost from different plant waste generated in the management of a green urban space. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, 2018. doi:10.5935/1806-6690.20180063.

SIQUEIRA, T. M.O.; ASSAD, M. L. R. C. L. Compostagem de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo (BRASIL). **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 18, n. 4, p.243-264, out. 2015.

SISTEMA DE REGISTRO NACIONAL DE EMISSÕES (SIRENE). **Emissões em dióxido de carbono equivalente por setor**. 2019. Disponível em: <<https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SOUZA, H. A. *et al.* Características físicas e microbiológicas de compostagem de resíduos animais. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, [s.l.], v. 71, n. 1, p.291-302, fev. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4162-9735>.

TORRES, C; FERMAM, R. K. S.; SBRAGIA, I. CDM projects in Brazil: market opportunity for companies and new designated operational entities. **Ambiente & Sociedade**, [s.l.], v. 19, n. 3, p.199-212, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc142054v1932016>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP; INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). **Global Waste Management Outlook**. Viena, 2015.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Waste and climate change: global trends and strategy framework**. 2010. Disponível em: <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8648>. Acesso em: 28 jan. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Clean development mechanism program activity Design Document Form (CDM-CPA-DD)**: Projeto Federal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos e Financiamento de Carbono da Caixa Econômica. 2012. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/ProgrammeOfActivities/Validation/DB/JVKYPM3AXKL44HJWFPI4FQZZJQDOH1/view.html>. Acesso em: 04 abr. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **CDM Methodology Booklet**. Eleventh edition Information updated as of EB 105 November 2019. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/meth_booklet.pdf#ACM0022. Acesso em: 01 abr. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Methodological tool - Tool to calculate the emission factor for an electricity system**. Version 04.0. 2013. MDL, Clean Development Mechanism. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-07-v1.1.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Methodological tool: Project and leakage emissions from composting**. Version 02.0. 2017a. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-13-v2.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Methodological tool**: Emissions From Solid Waste Disposal Sites. Version 08.0. 2017b. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-1.pdf/history_view>. Acesso em: 25 nov. 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Pesquisa de Projetos**. Nações Unidas: United Nations Framework Convention On Climate Change, 2020. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Small-scale methodology**: Avoidance of methane emissions through composting. AMS-III.F.Version 12.0. 2016. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/filestorage/V/5/B/V5BK1NFHM6ORYGI324CD78L0ZA9UJQ/EB92_repan11_AMS-III%20F.pdf?t=eDd8cWVzN3ZmfDCN4KbChBvTvaOvHgvBtulj>. Acesso em: 25 fev. 2020.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **The twenty-first session of the Conference of the Parties, COP21**, and the eleventh session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol (CMP) took place from 30 November to 11 December 2015, in Paris, France. 2015. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/paris-climate-change-conference-november-2015/cop-21>>. Acesso em: 05 fev. 2020.

VAN ELK, A. G. H. P. *et al.* Compresibilidade de resíduos sólidos urbanos em rellenos controlados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018. **Anais ...** Salvador: ABMS, 2018.

VAN ELK, A. G. H. P.; BOSCOV, M. E. G. Desafios Geotécnicos Advindos da Política Nacional de Resíduos Sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18, 2016. **Anais ...** Belo Horizonte: ABMS, 2016.

VAN ELK, A. G. H. P.; SEGALA, K (Coord.). **Redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

VERAS, R. S. **Compostagem de resíduos de alimentos e podas trituradas de árvores em leiras estáticas como mecanismo de redução de gee**. 2018. 110 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

VIANA, T. A. P. **Análise das estimativas de emissão de metano por aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil**. 2011. 98 p. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

WORLD BANK. **Brazil - Integrated Solid Waste Management and Carbon Finance Project. Independent Evaluation Group, Project Performance Assessment Report.** No. 123798. Washington, DC: WORLD BANK, 2018.

Disponível em:

<http://documents.worldbank.org/curated/en/395271521557013485/pdf/123798-PPAR-P106702-P124663-P164310-PUBLIC.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2020.

ZAGO, V. C. P.; BARROS, R. T. V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 24, n. 2, p.219-228, abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019181376>.

Emissões de metano na linha de base

Year	$W_{j,x}$	Σ	Σ	$BE_{CH_4,SWDS,y}$
	Food, food waste, beverages and tobacco (other than sludge)	Food, food waste, beverages and tobacco (other than sludge)		
2007	2.500,000	123,620	123,620	467,282
2008	3.110,000	103,088	226,707	856,954
2009	3.470,000	77,104	303,812	1.148,408
2010	4.010,000	59,730	363,541	1.374,187
2011	5.140,000	51,323	414,864	1.568,187
2012	5.220,000	34,940	449,804	1.700,259
2013	6.010,000	26,966	476,770	1.802,192
2014	6.580,000	19,791	496,562	1.877,003
2015	7.070,000	14,255	510,817	1.930,887
2016	7.430,000	10,042	520,859	1.968,848
2017	8.020,000	7,266	528,126	1.996,315
2018	9.303,000	5,650	533,776	2.017,673
2019	10.190,000	4,149	537,925	2.033,356
2020	0,000	0,000	414,305	1.566,074
2021	0,000	0,000	311,217	1.176,401
2022	0,000	0,000	234,113	884,948
2023	0,000	0,000	174,383	659,169
2024	0,000	0,000	123,060	465,168
2025	0,000	0,000	88,121	333,096
2026	0,000	0,000	61,154	231,163
2027	0,000	0,000	41,363	156,352
2028	0,000	0,000	27,108	102,468
2029	0,000	0,000	17,066	64,508
2030	0,000	0,000	9,799	37,041
2031	0,000	0,000	4,149	15,683
Total				26.433,624

Apêndice 2: Memorial de Cálculo das emissões de GEE na compostagem (Adicionalidade).

$$PE_{COMP,y} = PE_{EC,y} + PE_{FC,y} + PE_{CH_4,y} + PE_{N_2O,y} + PE_{RO,y}$$

Ano (y)	PE _{EC,y}	PE _{FC,y}	PE _{CH₄,y}	PE _{N₂O,y}	PE _{RO,y}	PE _{COMP,y}
2007	0,00	0,00	140,00	0,00	0,00	140,00
2008	0,00	0,00	174,16	0,00	0,00	174,16
2009	0,00	0,00	194,32	0,00	0,00	194,32
2010	0,00	0,00	224,56	0,00	0,00	224,56
2011	0,00	0,00	287,84	0,00	0,00	287,84
2012	0,00	0,00	292,32	0,00	0,00	292,32
2013	0,00	0,00	336,56	0,00	0,00	336,56
2014	0,00	0,00	368,48	0,00	0,00	368,48
2015	0,00	0,00	395,92	0,00	0,00	395,92
2016	0,00	0,00	416,08	0,00	0,00	416,08
2017	0,00	0,00	449,12	0,00	0,00	449,12
2018	0,00	0,00	520,97	0,00	0,00	520,97
2019	0,00	0,00	570,64	0,00	0,00	570,64
2020	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2022	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2024	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2025	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2026	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2027	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2028	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2029	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2030	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2031	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	0,00	0,00	4.370,97	0,00	0,00	4.370,97

Apêndice 3: Memorial de Cálculo das reduções de emissões de GEE com a utilização da compostagem.

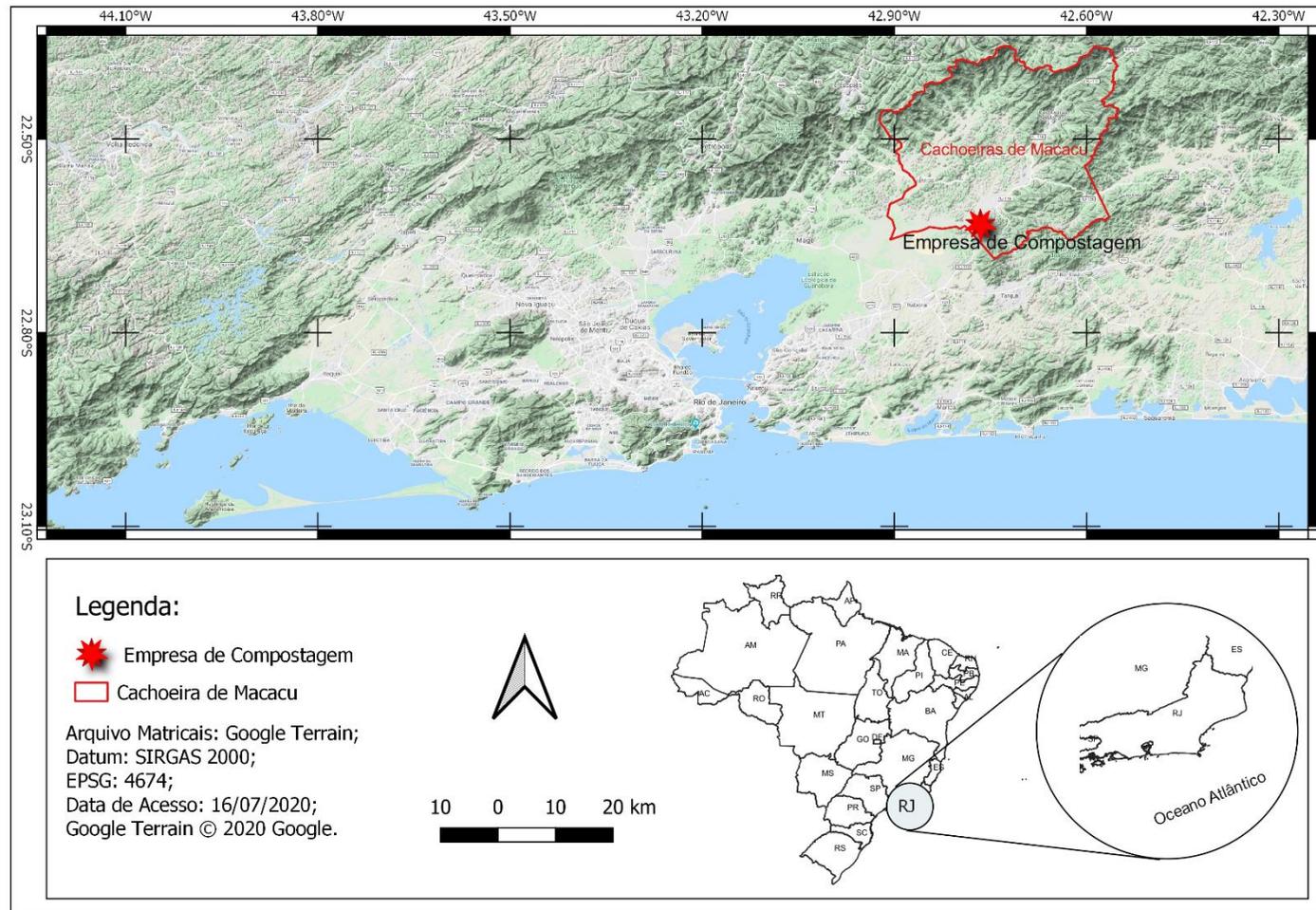
Redução de emissões pela compostagem

Ano	Emissão Compostagem (tCO ₂ eq)	%
2007	327,282	70,040
2008	682,794	79,677
2009	954,088	83,079
2010	1.149,627	83,659
2011	1.280,347	81,645
2012	1.407,939	82,807
2013	1.465,632	81,325
2014	1.508,523	80,369
2015	1.534,967	79,495
2016	1.552,768	78,867
2017	1.547,195	77,503
2018	1.496,705	74,180
2019	1.462,716	71,936
2020	1.566,074	100,000
2021	1.176,401	100,000
2022	884,948	100,000
2023	659,169	100,000
2024	465,168	100,000
2025	333,096	100,000
2026	231,163	100,000
2027	156,352	100,000
2028	102,468	100,000
2029	64,508	100,000
2030	37,041	100,000
2031	15,683	100,000
Total	22.062,656	83,464

Apêndice 4: Memorial de Cálculo das possibilidades de receitas com créditos de carbono com a utilização da compostagem

Data	Preço do RCE (EURO- €)	RCE (tCO ₂ eq)	€ x RCE
dez/05	21,1	0	0,00
dez/06	6,45	0	0,00
dez/07	22,41	327,282	7.334,39
dez/08	15,45	682,794	10.549,17
dez/09	12,31	954,088	11.744,82
dez/10	18,16	1.149,63	20.877,23
dez/11	9,92	1.280,35	12.701,04
dez/12	7,69	1.407,94	10.827,05
dez/13	5,33	1.465,63	7.811,82
dez/14	7,48	1.508,52	11.283,75
dez/15	8,29	1.534,97	12.724,88
dez/16	6,57	1.552,77	10.201,69
dez/17	8,18	1.547,20	12.656,06
dez/18	24,67	1.496,71	36.923,71
dez/19	24,51	1.462,72	35.851,17
dez/20	27,66	1.566,07	43.317,61
dez/21	27,66	1.176,40	32.539,25
dez/22	27,66	884,948	24.477,66
dez/23	27,66	659,169	18.232,61
dez/24	27,66	465,168	12.866,55
dez/25	27,66	333,096	9.213,44
dez/26	27,66	231,163	6.393,97
dez/27	27,66	156,352	4.324,70
dez/28	27,66	102,468	2.834,26
dez/29	27,66	64,508	1.784,29
dez/30	27,66	37,041	1.024,55
dez/31	27,66	15,683	433,79
Total	27,66	22.062,66	358.929,45

Apêndice 5: Mapa de localização da empresa de compostagem



Fonte: O autor, 2020.