



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAYCO SULLIVAN ARAUJO DE SANTANA

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
DO ATERRO SANITÁRIO DO AGRESTE ALAGOANO

Recife

2022

MAYCO SULLIVAN ARAUJO DE SANTANA

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
DO ATERRO SANITÁRIO DO AGRESTE ALAGOANO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos à obtenção do título de doutor em engenharia civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Nélia Henriques Callado.

Recife

2022

Catálogo na Fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S232p Santana, Mayco Sullivan Araujo de.
Potencial de geração de metano dos resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário do agreste alagoano / Mayco Sullivan Araujo de Santana. 2022.
190 f: il.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.
Coorientadora: Profa. Dra. Nélia Henriques Callado.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.
Inclui referências e anexos.

1. Engenharia civil. 2. Potencial de geração de metano de RSU no semi-árido. 3. Ensaio BMP. 4. Composição gravimétrica. 5. Modelagem geração de metano. I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. Callado, Nélia Heriques (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG / 2023 - 21

MAYCO SULLIVAN ARAUJO DE SANTANA

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
DO ATERRO SANITÁRIO DO AGRESTE ALAGOANO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos à obtenção do título de doutor em engenharia civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 19 / 12 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof.a Dra. Maria do Carmo Martins Sobral (examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota (examinador externo)
Universidade Federal do Ceará

participação por videoconferência
Prof. Dr. Joácio de Araújo Moraes Junior (examinador externo)
Universidade Federal da Paraíba

participação por videoconferência
Prof. Dr. Sérgio Peres Ramos da Silva (examinador externo)
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof.a Dr.a Alessandra Lee Barbosa Firmo (examinadora externa)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Primeiramente agradeço a Deus por me conduzir e me dar forças em todas as decisões que tomo em minha vida e por fazer com que eu sempre alcance os meus sonhos.

À minha mãe e familiares que de forma, direta ou indireta, sempre estiveram presentes em cada etapa da minha vida.

Ao meu padrinho Afrânio, por quem tenho um grande amor e admiração, muito obrigado por tudo que proporcionou nos meus estudos e na minha vida.

Ao professor Jucá pela compreensão, orientação e críticas fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À professora Nélia Callado pela orientação, apoio e ajuda para que eu conseguisse continuar e ter ânimo para finalizar o trabalho.

Ao professor da UFAL Lucena pelo conhecimento passado. À técnica Nadjane e alunos Gabriel, Beatriz e Kessya pela ajuda e aprendizado transmitido nas etapas da pesquisa.

À minha esposa Esterphany. Tenho certeza que sem ela nada disso seria possível. Ela é, sem dúvidas, a pessoa que mais me motiva, me ajuda e que mais acredita no meu potencial. Ela esteve presente em todos os momentos deste trabalho, cuidando de nossos filhos, me auxiliando e me dando forças para prosseguir. Nos momentos difíceis que encontrei foi por seu incentivo e palavras que me faziam ter forças para continuar.

Aos meus filhos Miguel e Marina. Por mais cansativo que tenha sido conciliar trabalho, estudos e atribuições de pai, fiz tudo pensando neles. Um dia vocês irão ler isto e quero que saibam o quanto eu os amo e o quanto eu quis finalizar este trabalho para que vocês pudessem ter orgulho de mim.

Ao meu pai Marcelo Medeiros de Santana. Ele foi a pessoa que mais me incentivou a estudar e tinha o maior orgulho de ter um filho que cursava doutorado. Graças a meu pai eu tive oportunidades de bons estudos. Hoje ele não está vivo para ver a minha conquista, mas sei que de onde estiver ele estará feliz por minhas vitórias.

A todos que de alguma forma contribuíram para tornar possível a realização deste trabalho, muito obrigado.

RESUMO

A emissão de gás metano, gerado pela decomposição dos resíduos sólidos em aterros sanitários, é um dos graves problemas de poluição atmosférica e, uma forma de minimizar os impactos do metano no meio ambiente é através do seu aproveitamento para geração de energia. Embora exista uma ampla pesquisa sobre o tema, dados específicos para regiões semi-áridas ainda são escassos. A presente pesquisa teve como proposta realizar o levantamento do potencial de geração de gás metano da fração orgânica dos RSU do Aterro do Agreste Alagoano, que recebe resíduos de 29 municípios através do consórcio da CONAGRESTE, e, através de modelos matemáticos aplicados nos programas computacionais do LandGEM e do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), realizar a estimativa teórica de produção de CH₄ durante a vida útil do aterro em dois cenários: um com valores padrões dos programas para a região climática local e outro com informações obtidas a partir de dados experimentais. Como dados experimentais foram realizados estudos da composição gravimétrica dos RSU dos municípios envolvidos, a fim de obter uma amostra representativa dos resíduos depositados; análises físico-químicas da fração orgânica dos RSU; e ensaios de BMP (Biochemical Methane Potential) para determinação do potencial de geração de gás metano, constante cinética de decaimento (K_{exp}) e carbono orgânico degradável (COD). Os resultados mostram que a composição gravimétrica dos RSU do aterro possui a matéria orgânica com maior índice (47,24%), seguido de plástico rígido/flexível (22,35%) e resíduos sanitários (11,06%). Em menores quantidades a borracha (0,90%), couro (0,22%) e madeira (0,20%). Nos ensaios BPM a fração orgânica apresentou potencial de geração de CH₄, 207,80 NmLCH₄/gSV. Quando adotados dados padrões de entrada, o modelo LandGEM apresentou valor 38% superior na produção de CH₄ em relação ao modelo IPCC. Quando considerados dados de entradas obtidos experimentalmente, o IPCC apresentou geração de CH₄ 32,66% maior que o LandGEM, isso foi possível devido ao valor de COD que ficou elevado em consequência do L₀ da fração orgânica, passando do valor teórico de 0,15 para o valor experimental de 0,27 no novo cenário. Esta pesquisa apresenta como inovação a determinação de parâmetros experimentais aplicados à modelagem matemática de geração de metano em aterro de uma região de agreste e uma metodologia com base na regionalização para a composição gravimétrica dos RSU dispostos no aterro.

Palavras-chave: potencial de geração de metano de RSU no semi-árido; ensaio BMP; composição gravimétrica; modelagem geração de metano.

ABSTRACT

The emission of methane gas, generated by the decomposition of solid waste in landfills, is one of the serious problems of atmospheric pollution and one way to minimize the impacts of methane on the environment is through its reuse for energy generation. Although there is tremendous research on the subject, specific data for semi-arid regions are still scarce. This research has a proposal to do a survey of the potential of methane gas generation using the organic fraction of MSW in Agreste Landfill, which receives waste from 29 cities through the CONAGRESTE consortium, and, through mathematical models applied in LandGEM and Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) computer programs, to do the theoretical estimation of CH₄ production during the useful life of the landfill in two scenarios: one with default values from the programs for the local climate region and the other with information obtained from experimental data. As experimental data studies of the gravimetric composition of the MSW of the involved municipalities were carried out, in order to obtain a representative sample of the deposited waste; physical-chemical analyses of the organic fraction of MSW; and BMP (Biochemical Methane Potential) tests to determine the potential of methane gas generation, kinetic constant of decay (K_{exp}) and degradable organic carbon (COD). The results showed that the gravimetric composition of the MSW of the landfill has the organic matter with the highest index (47.24%), followed by rigid/flexible plastic (22.35%) and sanitary waste (11.06%). In smaller quantities rubber (0.90%), leather (0.22%) and wood (0.20%). In the BPM tests the organic fraction presented potential of CH₄ generation, 207.80 NmLCH₄/gSV. When adopted standard input data, LandGEM model presented 38% higher value in CH₄ production in relation to IPCC model. When considered experimentally obtained input data, IPCC presented CH₄ generation 32.66% higher than LandGEM, this was possible due to the COD value that was elevated as a result of the L₀ of the organic fraction, going from the theoretical value of 0.15 to the experimental value of 0.27 in the new scenario. This research presents as an innovation the determination of experimental parameters applied to the mathematical modeling of methane generation in landfills in an agreste region and a methodology based on regionalization for the gravimetric composition of the MSW disposed in the landfill.

Keywords: potential for MSW methane generation in semi-arid region; BMP test; gravimetric composition; methane generation modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de RSU no Brasil	22
Figura 2 - Geração per capita de RSU nas regiões do Brasil em 2020.....	23
Figura 3 - Índice de cobertura de coleta de RSU no Brasil e regiões em 2020	24
Figura 4 - Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (t/dia)	25
Figura 5 - Espacialização do tipo de disposição final utilizada nos municípios	26
Figura 6 - Rota tecnológica com três tipos de coletas e aproveitamento de orgânicos	28
Figura 7 - Mapa das regiões dos consórcios do estado de Alagoas.....	31
Figura 8 - Rotas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.....	33
Figura 9 - Distribuição do número de plantas de biogás e do volume de biogás levantados em 2020	44
Figura 10 - Distribuição das aplicações e volume de biogás em cada região do Brasil em 2020	46
Figura 11 - Vista aterro Bandeirantes.....	50
Figura 12 - Vista termelétrica de Caieiras	51
Figura 13 - Usina aterro sanitário de Macaúbas – MG.....	52
Figura 14 - Central de Resíduos de Recreios – RS.....	52
Figura 15 - Usina Termelétrica – Aterro Salvador	53
Figura 16 - Central de Biogás – Aterro Maranhão	54
Figura 17 - Usina de Biogás – Aterro Petrolina (PE).....	54
Figura 18 - Tipo de cobertura - controle de infiltração	65
Figura 19 - Tipos de cobertura - controle de liberação de gases	65
Figura 20 - Tipos de cobertura - separação física do resíduo com meio ambiente.	65
Figura 21 - Camada de cobertura final para aterros não perigosos e perigosos	66
Figura 22 - Fluxograma das atividades desenvolvidas	71
Figura 23 - Vista aérea do Aterro Sanitário do Conagreste.....	72
Figura 24 - Mapa dos municípios integrantes do aterro do CONAGRESTE.....	74
Figura 25 - Mapa dos municípios integrantes da região 1(R1)	77
Figura 26 - Mapa dos municípios integrantes da região 2 (R2)	78
Figura 27 - Mapa dos municípios integrantes da região 3 (R3).	78
Figura 28 - Mapa do município de Arapiraca.....	79
Figura 29 - Esquema da Composição Gravimétrica.....	81
Figura 30 - Área destinada para a realização da análise gravimétrica.....	81

Figura 31 - Coleta de resíduos do despejo de resíduos do compactador.....	82
Figura 32 - Transporte dos resíduos até a área destinada para gravimetria.....	82
Figura 33 - Rompimento dos sacos plásticos.....	83
Figura 34 - Homogeneização dos resíduos.....	83
Figura 35 - Quarteamento dos resíduos.....	84
Figura 36 - Mini balança digital utilizada na pesagem.....	85
Figura 37 - Esquema geral das etapas das amostras utilizadas nos ensaios.....	88
Figura 38 - Preparação da amostra (a), Trituração em liquidificador industrial (b).....	88
Figura 39 - Equipamentos para análise de sólidos voláteis: Balança analítica (a), dessecador (b), estufa (c) e forno mufla (d).....	89
Figura 40 - Equipamento para determinação do pH: Agitador magnético (a), medidor de pH (b) e soluções padrões de pH iguais a 7,0 e 4,0 (c).....	90
Figura 41 - Agitador vortex (a), balança analítica (b), digestor (c), espectrofotômetro (d) e soluções de digestão (dicromato de potássio e sulfato de mercúrio) e de ácido sulfúrico e sulfato de prata (e).....	90
Figura 42 - Headspace dos reatores borbulhado por Argônio (a); Frascos incubados na estufa(b); Câmara incubadora (c).....	94
Figura 43 - Cromatógrafo gasoso (a), coluna Carboxen (b) e seringa GASTIGHT® (c).....	95
Figura 44 - Tela de inserção de dados do programa IPCC.....	105
Figura 45 - Tela de inserção de dados do programa LandGEM.....	107
Figura 46 - Localização do Aterro Sanitário do Agreste Alagoano.....	109
Figura 47 - Localização do Aterro Sanitário do Agreste Alagoano e núcleos habitacionais.....	110
Figura 48 - Precipitação acumulada mensal e temperaturas médias da área estudada.....	111
Figura 49 - Solo da área estudada.....	111
Figura 50 - Geologia da área estudada.....	112
Figura 51 - Geomorfologia da área estudada.....	113
Figura 52 - Projeto do Aterro Sanitário.....	114
Figura 53 - Unidades do Aterro Sanitário.....	115
Figura 54 - Tratamento de gases do aterro sanitário do Agreste.....	116
Figura 55 - Sistema de tratamento de lixiviado no aterro.....	117
Figura 56 - IDHM, Renda e PIB médio por região.....	119
Figura 57 - Composição gravimétrica dos RSU das 5 cidades estudadas do aterro do agreste alagoano.....	121
Figura 58 - Composição gravimétrica dos RSU do aterro do agreste alagoano.....	123

Figura 59 - Comparação da composição gravimétrica média dos RSU do Aterro e do Brasil.....	123
Figura 60 - Produção média diária e acumulada de CH ₄ nos reatores SEM Inóculo	132
Figura 61 - Produção média diária e acumulada de CH ₄ no reator do inóculo	133
Figura 62 - Produção média diária e acumulada de CH ₄ nos reatores COM Inóculo	133
Figura 63 - Comparação das amostras individuais de inóculo e fração orgânica.....	134
Figura 64 - Produção acumulada de CH ₄ ajustada ao modelo de Gompertz modificado - COM Inóculo	135
Figura 65 - Produção acumulada de CH ₄ ajustada ao modelo de Gompertz modificado - SEM Inóculo	135
Figura 66 - Comparação dos volumes acumulados de CH ₄ dos reatores com e sem inóculo	135
Figura 67 - Taxa máxima de CH ₄ obtida nos ensaios.....	138
Figura 68 - Potencial de geração de CH ₄ obtidos nos ensaios.....	138
Figura 69 - Estimativa de geração de gás metano utilizando modelo Landgem – Cenário 1.	141
Figura 70 - Geração de gás metano durante a vida útil do aterro utilizando modelo Landgem – Cenário 1.....	142
Figura 71 - Estimativa de geração de gás metano utilizando modelo IPCC – Cenário 1.....	144
Figura 72 - Geração de gás metano durante a vida útil do aterro utilizando modelo IPCC – Cenário 1.....	144
Figura 73 - Contribuição de CH ₄ de cada componente do resíduo – Cenário 1	145
Figura 74 - Comparação na estimativa de CH ₄ entre os modelos Landgem e IPCC – Cenário 1.....	146
Figura 75 - Comparação na estimativa de CH ₄ durante o horizonte estudado – Cenário 1...	146
Figura 76 - Estimativa de geração de gás metano utilizando modelo Landgem – Cenário 2	149
Figura 77 - Geração de gás metano durante o horizonte estudado no aterro - Cenário 2.....	149
Figura 78 - Comparação na estimativa de CH ₄ entre os cenários 1 e 2 através do Modelo Landgem	150
Figura 79 - Estimativa de geração de gás metano utilizando modelo IPCC – Cenário 2.....	151
Figura 80 - Geração de gás metano durante o horizonte estudado do aterro utilizando – Cenário 2.....	151
Figura 81 - Comparação na estimativa de geração de CH ₄ entre os cenários 1 e 2 do modelo IPCC	152
Figura 82 - Contribuição de CH ₄ de cada componente do resíduo – Cenário 2	152

Figura 83 - Comparação na estimativa de geração de CH ₄ da matéria orgânica entre os cenários 1 e 2	153
Figura 84 - Comparação na estimativa de CH ₄ entre os modelos Landgem e IPCC – Cenário 2.....	154
Figura 85 - Comparação na estimativa de CH ₄ em 20 anos entre o Landgem e IPCC – Cenário 2.....	154
Figura 86 - Estimativa de CH ₄ entre os cenários mais otimistas: Landgem (cenário 1) e IPCC (cenário 2).....	155
Figura 87 - Estimativa de CH ₄ entre cenários mais pessimistas: Landgem (cenário 2) e IPCC (cenário 1).....	155
Figura 88 - Potencia gerada ao longo do tempo	157
Figura 89 - Energia disponível ao longo do tempo	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de RSU coletado por regiões do Brasil.	23
Tabela 2 - Geração de RSU no estado de Alagoas.	28
Tabela 3 - Disposição Final dos Resíduos Sólidos no Estado de Alagoas (t/dia).....	30
Tabela 4 - Faixa de operação ótima de alguns parâmetros do processo de digestão anaeróbia.....	36
Tabela 5 - Classificação, por origem do substrato, das plantas de biogás com fins energéticos em operação no Brasil em 2020.	44
Tabela 6 - Classificação, por aplicação energética do biogás, de plantas de biogás energéticos no Brasil.....	46
Tabela 7 - Origem e quantidade de biogás que poderia ser reaproveitado em Alagoas.47	
Tabela 8 - Usinas termelétricas para geração de energia elétrica.	55
Tabela 9 - Modelos de diferentes ordens	56
Tabela 10 - Valores sugeridos para constante de degradação K.	57
Tabela 11 - Faixas recomendadas e valores default da fração de carbono orgânico degradável (CODi).....	60
Tabela 12 - Faixas e valor default das constantes de degradação (ki) nos componentes dos RSU para regiões de clima tropical.....	60
Tabela 13 - Principais características geotécnicas e efeitos na emissão de gases	67
Tabela 14 - Estudos com emissões fugitivas de metano em aterros sanitários	69
Tabela 15 - Municípios que dispõem RSU no aterro do CONAGRESTE. Dados de população de 2019.	73
Tabela 16 - Empresas privadas que destinam os resíduos para o aterro do CONAGRESTE.	75
Tabela 17 - Regiões de Arapiraca selecionadas para pesquisa.....	79
Tabela 18 - Componentes dos RSU e suas características.	86
Tabela 19 - Disposição experimental.	92
Tabela 20 - Equações matemáticas para estimativas de crescimento populacional.	99
Tabela 21 - Taxa de Geração per Capita de resíduos sólidos urbanos por faixa de população.....	100
Tabela 22 - Valor padrão da constante de degradação (ki) nos componentes dos RSU.101	
Tabela 23 - Valores defaults da fração de carbono orgânico degradável (CODi).....	103
Tabela 24 - Aproveitamento e representatividade da ocupação do terreno.....	115

Tabela 25 - IDHM e Renda Per Capita das 5 cidades estudadas do aterro do agreste alagoano.....	118
Tabela 26 - IDHM e Renda Per Capita das cidades das regiões estudadas do aterro. .	118
Tabela 27 - Composição gravimétrica dos RSU das cidades selecionadas.....	120
Tabela 28 - Estimativa populacional dos municípios que destinam os resíduos para o aterro do CONAGRESTE.....	127
Tabela 29 - Estimativa de geração per capita de RSU dos municípios que destinam os resíduos para o aterro do CONAGRESTE.....	128
Tabela 30 - Caracterização do substrato.....	129
Tabela 31 - Caracterização do inóculo.....	131
Tabela 32 - Duração de operação dos reatores.....	132
Tabela 33 - Constantes cinéticas do modelo de Gompertz modificado e valores de R2.....	136
Tabela 34 - Potencial de geração de CH ₄ e taxa máxima de CH ₄	138
Tabela 35 - Constante cinética de decaimento k.....	139
Tabela 36 - Componentes RSU para IPCC e LandGEM.....	140
Tabela 37 - Produção de gás metano pelo modelo Landgem – Cenário 1.....	141
Tabela 38 - Produção de gás metano pelo modelo IPCC – Cenário 1.....	143
Tabela 39 - Produção de gás metano pelo modelo Landgem – Cenário 2.....	148
Tabela 40 - Produção de gás metano pelo modelo IPCC – Cenário 2.....	150
Tabela 41 - Produção de gás metano pela matéria orgânica nos dois cenários.....	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT –	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE -	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;
CONAGRESTE -	Consortio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste Alagoano
BMP –	Potencial Bioquímico de Metano
CH ₄ –	Gás Metano
COD –	Carbono Orgânico Degradável
CTR -	Central de Tratamento de Resíduos
DA –	Digestão Anaeróbia
DBO -	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO -	Demanda química de Oxigênio
EPA -	Environmental Protection Agency
GEE -	Gases de efeito estufa
IPCC -	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MDL –	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MO –	Matéria Orgânica
NmL –	Normal mililitro (0°C, 1013 hPa)
NmL/g –	Normal mililitros por grama (0°C, 1013 hPa)
NmLlgSV -	Normal mililitros por grama de sólidos voláteis (0°C, 1013 hPa)
PERS –	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
pH –	Potencial Hidrogeniônico
PNRS -	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU -	Resíduos Sólidos Urbanos
SEMARH/AL -	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas
SNIS –	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ST –	Sólidos Totais
STV –	Sólidos Totais Voláteis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Estrutura da Tese.....	19
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	Objetivo Geral.....	21
2.2	Objetivos Específicos.....	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1	Panorama dos Resíduos Sólidos Urbano no Brasil.....	22
3.1.2	Panorama dos RSU no Estado de Alagoas.....	28
3.2	Degradação de resíduos sólidos orgânicos.....	31
3.2.1	Etapas da digestão anaeróbia.....	33
3.2.2	Fatores que influenciam a DA e a geração de metano dos RSU em aterros sanitários.....	35
3.2.2.1	Temperatura.....	36
3.2.2.2	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	37
3.2.2.3	Inóculo.....	38
3.2.2.4	Agitação.....	39
3.2.2.5	Teor de Sólidos Voláteis.....	39
3.2.2.6	Umidade.....	40
3.2.2.7	DBO e DQO.....	41
3.3	Biogás.....	42
3.3.1	Panorama do Biogás no Brasil e Alagoas.....	44
3.3.2	Aproveitamento de biogás em aterros sanitários.....	47
3.3.3	Aterros de RSU com Aproveitamento para Energia Elétrica no Brasil.....	50
3.4	Modelos matemáticos de geração de gás metano.....	55
3.4.1	Modelo EPA (2005).....	56
3.4.2	Aplicação do Modelo IPCC (2006).....	58
3.5	Ensaio do Potencial Bioquímico de Metano (Ensaio BMP).....	62
3.6	Camada de Cobertura e Emissões Fugitivas de CH ₄	64
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	71
4.1	Identificação da área de trabalho.....	71
4.2	Municípios Integrantes do aterro.....	72

4.3	Levantamento de dados de projeto e fatores ambientais da área.....	75
4.4	Caracterização dos resíduos que chegam ao aterro sanitário.....	76
4.4.1	Amostragem e rotas de coleta.....	79
4.4.2	Caracterização gravimétrica	80
4.4.3	Caracterização físico-química da fração orgânica	87
4.4.3.1	Teor de Umidade	87
4.4.3.2	Preparação das amostras	87
4.4.3.3	Teor de Sólidos Voláteis.....	88
4.4.3.4	Potencial Hidrogeniônico - pH	90
4.4.3.5	Demanda química de Oxigênio – DQO.....	90
4.4.3.6	Demanda bioquímica de oxigênio - DBO	91
4.5	Ensaio de Produção Bioquímica	92
4.5.1	Inóculo	93
4.5.2	Circulação de N ₂ , incubação e monitoramento dos frascos.....	93
4.5.3	Cromatografia gasosa	94
4.5.4	Produção de Metano (CH ₄).....	95
4.5.5	Cálculo dos parâmetros k e L ₀ experimentais da fração orgânica	97
4.6	Estudo da geração de gás metano por modelos matemáticos.....	98
4.6.1	Estudo da projeção populacional	99
4.6.3	Aplicação do Modelo IPCC (2006)	101
4.6.4	Aplicação do Modelo EPA (2005)	106
5	CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO.....	109
5.1	Localização do Aterro Sanitário	109
5.2	Condições Climáticas da Região	110
5.3	Solo da Região.....	111
5.5	Aspectos Físicos e Técnicos do Aterro.....	114
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	118
6.1	COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA	118
6.2	CÁLCULO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	126
6.3	ENSAIOS DE PRODUÇÃO BIOQUÍMICA DE METANO	128
6.3.1	Caracterização físico-química da fração orgânica.....	128
6.3.1.1	Teor de Umidade	129
6.3.1.2	Potencial Hidrogeniônico - pH	129
6.3.1.3	DQO.....	130

6.3.1.4	Teor de Sólidos	130
6.3.2	Caracterização físico-química do lodo	130
6.3.3	Produção de Metano	131
6.3.4	Parâmetros cinéticos k e L ₀	137
6.4	MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA GERAÇÃO DE METANO.	140
6.4.1	Cenário 1.....	141
6.4.2	Cenário 2.....	147
6.5	POTÊNCIA E ENERGIA DISPONÍVEL	156
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	159
7.1	Conclusões.....	159
7.2	Recomendações para pesquisas futuras	161
	REFERÊNCIAS	163
	APÊNDICE A - INDICADORES SOCIOECONÔMICOS DOS MUNICÍPIOS QUE INTEGRAM A CTR AGRESTE.....	181
	APÊNDICE B - EQUAÇÕES DE CRESCIMENTO POPULACIONAL DAS CIDADES	182
	APÊNDICE - C PROJEÇÃO POPULACIONAL DE CADA MUNICÍPIO INTEGRANTE DA CTR AGRESTE.....	183
	APÊNDICE - D QUANTITATIVO DE RSU DESTINADOS AO ATERRO (ANO 2020 E 2021).....	184
	APÊNDICE - E DADO DA CROMATOGRAFIA DOS REATORES.....	186

1 INTRODUÇÃO

O aterro sanitário é uma forma de disposição final adequada para os resíduos sólidos urbanos (RSU), mas existe uma preocupação com o biogás gerado, onde o metano encontra-se em maior quantidade (SALOMON e LORA, 2005; ZANETTE, 2009), o qual é um dos mais importantes gases de efeito estufa – GEE, pois seu potencial de aquecimento global é 28 vezes maior que o dióxido de carbono (UNECE, 2019). Por outro lado, o metano contido no biogás apresenta um potencial energético elevado podendo ser utilizado como fonte de energia.

Assim, a gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos e a geração de energia, através do metano em aterros sanitários, são soluções ambientalmente sustentáveis podendo ser fonte de energia elétrica renovável e limpa. Além disso, o estudo da geração de energia a partir do metano permite a redução de fugas dos gases do efeito estufa e a maximização do índice de conversão do metano, contabilizado no cálculo para emissão de crédito de carbono dentro do mecanismo de desenvolvimento limpo, além de reduzir a necessidade dos combustíveis fósseis.

Zavarise et al. (2021) citam que tem sido observada uma tendência de crescimento no número de publicações de geração de metano a partir de 2013, onde a Índia e a China são os que mais publicam, estando o Brasil em sexto lugar, com apenas um terço das publicações desses dois países. Esses autores apontam, também, que os principais pontos negativos desses estudos é a falta de dados atualizados sobre a composição física dos RSU gerados e sobre a infraestrutura dos aterros sanitários inviabilizando estimativas teóricas mais acuradas; e que as estimativas de CH₄ podem ser super ou subestimadas devido ao ajuste inadequado dos parâmetros do modelo.

Deste modo, estudos sobre gerenciamento de resíduos e de seu potencial de recuperação energética por meio de novas tecnologias merecem atenção, uma vez que representam uma oportunidade de aproveitamento destes materiais e redução dos efeitos de poluição que podem causar (DAMRONGSAK; CHAICHANA; WONGSAPAI, 2017; GAO *et al.*, 2019).

Nos aterros sanitários, é a fração orgânica dos RSU que tem maior potencial de conversão em biocombustível gasoso (biogás), rico em metano, por meio de processos bioquímicos, como a digestão anaeróbia. De acordo com Magalhães (2018), os processos anaeróbios figuram como uma alternativa promissora para geração de biogás, em virtude das altas taxas de conversão, e a aplicação de modelos matemáticos para a estimativa do potencial de produção de biogás são ferramentas essenciais, tanto para os estudos energéticos, quanto ambientais.

Embora os modelos matemáticos ofereçam parâmetros padrões de entrada, a fidelidade de sua aplicação depende principalmente da confiabilidade desses dados e do grau de similaridade entre a realidade do local em estudo e outros locais já modelados com sucesso. Entre os dados de entrada dos modelos matemáticos destacam-se a geração e a composição gravimétrica dos resíduos que chegam ao aterro para determinação de seus componentes e de suas porcentagens, o potencial de geração de gás metano (L_0), o carbono orgânico degradável (COD), a constante cinética de decaimento K , e outros dados levantados a partir do diagnóstico do aterro sanitário.

Uma das técnicas para a estimativa do potencial de geração de gás metano, a partir dos resíduos orgânicos, são os ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP), que são utilizados no mundo inteiro e se mostraram como uma ferramenta experimental para o estudo do tratamento da fração orgânica dos resíduos, apresentando um excelente indicativo da produção de metano.

Os parâmetros adotados, ou determinados experimentalmente, podem ser utilizados na modelagem para estimar a produção de gás metano em diferentes cenários e utilizando vários modelos disponíveis, desenvolvendo uma curva que prevê a geração de metano ao longo do tempo. A escolha do modelo mais adequado e a consideração das diferentes condições climáticas e operacionais de cada aterro sanitário na adoção dos parâmetros de entrada são de suma importância para resultados mais próximos da realidade.

Diante disto, a proposta deste trabalho foi avaliar, experimentalmente, a produção de gás metano, proveniente da digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos do Aterro Sanitário do Agreste Alagoano, através da realização de ensaios de Potencial Bioquímico do Metano (BMP) e, através de modelagem matemática, estimar o potencial de geração de gás metano durante a vida útil do aterro.

1.1 Justificativa

O aterro sanitário, abordado neste estudo, compreende o da região agreste alagoano. É um dos sete aterros consorciados previstos pela Política Estadual de Resíduos Sólidos de Alagoas (Lei nº 7749, de 13 de outubro de 2015). Este aterro, foi construído na cidade de Craíbas/AL através do Consorcio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste (CONAGRESTE), iniciou sua operação em 2017 com previsão de vida útil de 20 anos, atendendo a 29 municípios.

Embora a produção de metano tenha sido objeto de estudo de muitos autores, visando colaborar com a matriz energética e a redução dos impactos ocasionados ao meio ambiente, o aterro do

CONAGRESTE não possui sistema, nem estudos, do potencial de aproveitamento do metano produzido. Além disso, nem o estado de Alagoas nem a literatura científica, possui tais estudos aplicados a regiões com as características socioeconômicas e ambientais do agreste alagoano, o que justifica a execução desta pesquisa. Destaca-se, então, a grande relevância do tema, tanto para o estado da arte quanto, para a localidade, devido à importância desse aterro sanitário para essa região.

A determinação experimental de parâmetros de biodegradação, nas condições do agreste alagoano, podem minimizar as incertezas presentes no processo de estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário, subsidiando novos estudos na região, ou para regiões semelhantes, incentivando o desenvolvimento no âmbito tecnológico na localidade e a elaboração de novas pesquisas de aproveitamento energético do biogás. Pode, também, ser adequado para o estudo de outras realidades com características desta sub-região nordestina, contribuindo para a minimização dos impactos ambientais e o desenvolvimento sustentável da região.

Por se tratar de um aterro consorciado, esta pesquisa apresenta como inovação não só a determinação de parâmetros experimentais aplicados à modelagem matemática de geração de gás metano em aterros na região de agreste, mas também, apresenta contribuições metodológicas de levantamento de composição gravimétrica dos RSU através de uma análise regionalizada, levando em conta não só a representatividade populacional, mas as rotas de coleta, fatores geográficos, econômicos e culturais que possam representar uma influência a área de abrangência do aterro.

As hipóteses do trabalho são de que o aterro sanitário em estudo pode apresentar um elevado potencial de geração de gás metano, o que pode ser utilizado para o seu reaproveitamento na geração de potência e energia? Além disso, de que forma os modelos matemáticos podem auxiliar na estimativa de gás metano e potencial energético do aterro? Como as características da composição gravimétrica e determinação da fração orgânica degradável podem influenciar na geração de gás metano?

1.2 Estrutura da Tese

Esta tese está estruturada nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1:** apresenta a introdução do trabalho da pesquisa, abordando a justificativa, contribuição científica e hipótese da pesquisa.

- **Capítulo 2:** apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos da tese.
- **Capítulo 3:** apresenta a revisão bibliográfica sobre os temas que estão relacionados à temática do trabalho, contemplando sequencialmente os seguintes itens: (I) panorama dos RSU no Brasil e em Alagoas; (II) Degradação dos resíduos sólidos orgânicos; (III) Fatores que influenciam na geração de gás metano; (IV) Panorama do biogás no Brasil e Alagoas; (V) Aproveitamento de biogás em aterros sanitários; (VI) Aterros de RSU com aproveitamento energético no Brasil; (VII) Modelos matemáticos de geração de gás metano; (VIII) Ensaio do potencial bioquímico de metano; (IX) Camada de cobertura e emissões fugitivas de CH₄.
- **Capítulo 4:** descreve e apresenta os procedimentos metodológicos para alcançar os resultados dos objetivos proposto no trabalho.
- **Capítulo 5:** apresenta a caracterização do aterro contendo sua localização, condições climáticas, solo, geologia, geomorfologia, aspectos físicos e técnicos do aterro.
- **Capítulo 6:** apresenta os resultados e discussões obtidos da pesquisa;
- **Capítulo 7:** apresenta as principais conclusões obtidas na pesquisa juntamente com a proposição de trabalhos futuros nesta temática. Por fim, são listadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o potencial de geração de gás metano, a partir da biodegradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, do aterro sanitário do Consórcio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste Alagoano.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Levantar os parâmetros de projeto do aterro sanitário do CONAGRESTE e os fatores ambientais regionais que tem influência no potencial de geração de metano;
- Aplicar uma metodologia de análise de composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos, para aterros consorciados, no aterro sanitário do agreste de Alagoas;
- Analisar as características físicas e químicas da fração orgânica dos RSU depositados no aterro sanitário, com base nos seguintes parâmetros: teor de umidade; teor de sólidos voláteis, pH, condutividade elétrica; DQO e DBO;
- Analisar o potencial de geração de gás metano através de ensaios de Produção Bioquímica de Metano (BMP) da fração orgânica dos RSU, com e sem a influência de inóculo;
- Determinar os parâmetros regionais de Constante cinética de decaimento ($K_{\text{experimental}}$) e Carbono orgânico degradável (COD) da fração orgânica dos RSU do aterro;
- Analisar a geração de gás metano, em dois cenários, através de dois modelos matemáticos, LandGem e IPCC;
- Determinar a potência e energia disponível com base no cenário mais otimista e no cenário mais pessimista na produção de metano.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

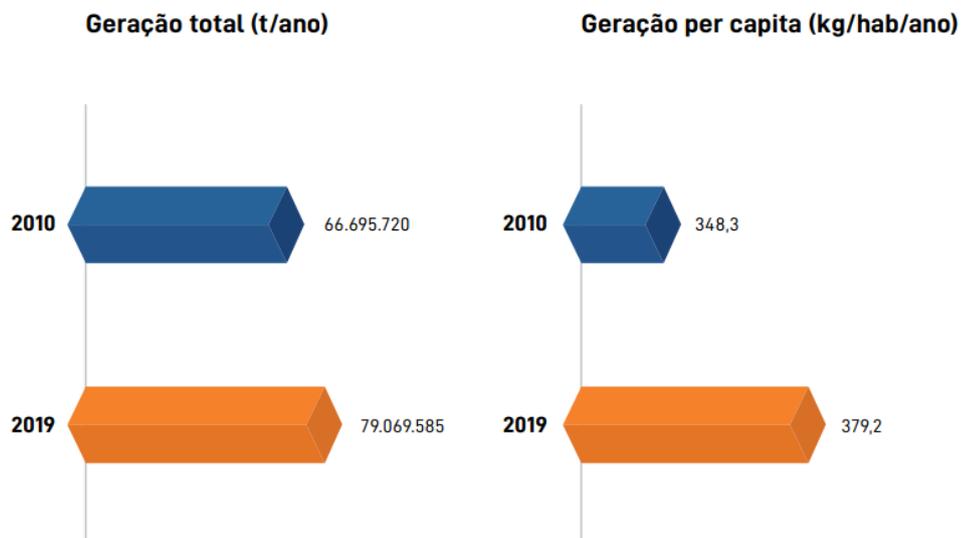
3.1 Panorama dos Resíduos Sólidos Urbano no Brasil

Atualmente são produzidos mais de 1,3 bilhão de toneladas de resíduos sólidos por ano no planeta, de origem urbana, domiciliar, hospitalar, industrial, entre outras, sendo que grande parte desse volume tem como disposição final vazadouros a céu aberto, corpos d'água, terrenos baldios e outros locais não preparados para receber este tipo de material (MAGALHÃES, 2018).

A geração de resíduos está diretamente ligada aos hábitos de consumo e padrão de vida da população e sua disposição final reflete a qualidade de vida da população e, neste contexto, a disposição final do lixo urbano é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos em todo o mundo e tende a agravar-se com o aumento do consumo de bens descartáveis, que passam cada vez mais a compor os grandes volumes de resíduos gerados pela população (PECORA et al., 2009).

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, lançado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), entre 2010 e 2020, a geração de RSU no Brasil passou de 67 milhões para 79 milhões de tonelada por ano, aumento de aproximadamente 17%. Por sua vez, a geração per capita aumentou de 348,3 kg/ ano para 379,2 kg/ano, um aumento de 8,8%, Figura 1.

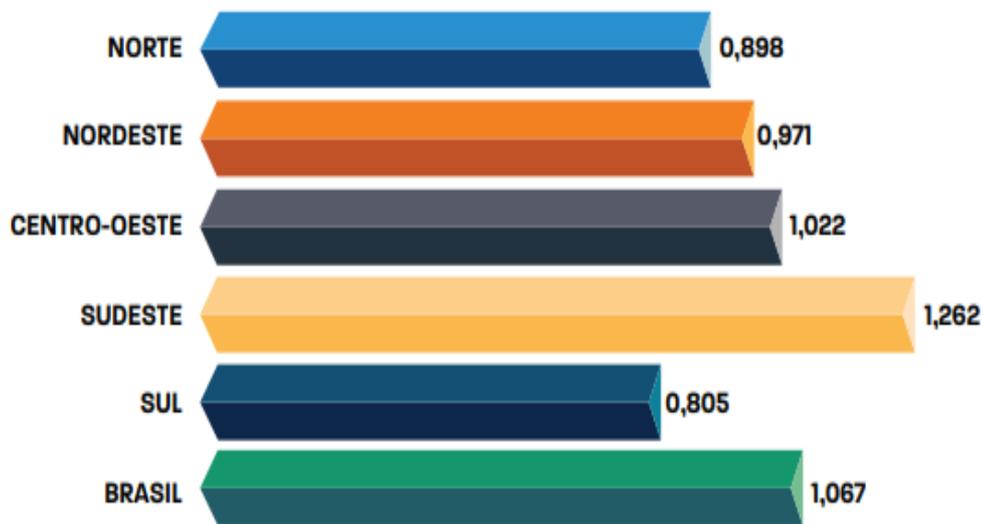
Figura 1 - Geração de RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE (2021).

Os dados apurados pela ABRELPE (2021) mostram que a geração de RSU no país sofreu influência direta da pandemia da COVID-19 durante o ano de 2020, tendo alcançado 225.965 toneladas diárias, uma média de 1,07kg de resíduo por dia para cada brasileiro. O Brasil apresenta valores médios per capita que vão de 0,805kg/hab.dia na região Sul até 1,262kg/hab.dia na região Sudeste, sendo o Nordeste com uma média de 0,971 kg/hab.dia, Figura 2.

Figura 2 - Geração per capita de RSU nas regiões do Brasil em 2020



Fonte: ABRELPE, (2021).

A Tabela 1 mostra que a quantidade de RSU coletados em 2020 cresceu em todas as regiões em comparação a década anterior, passou de 59 milhões de toneladas para 76,1 milhões, e uma cobertura média de coleta de 88% para 92,2%. A região Sudeste é responsável pela maior massa coletada dentre as demais regiões do país, com pouco mais de 40 milhões de toneladas por ano, seguida das regiões Nordeste, com pouco mais de 16,5 milhões (ABRELPE, 2021).

Tabela 1 - Quantidade de RSU coletado por regiões do Brasil

<i>Regiões</i>	<i>2010</i>		<i>2020</i>	
	<i>RSU Total (t/ano)</i>		<i>RSU Total (t/ano)</i>	
<i>Norte</i>	3.530.280		4.982.940	
<i>Nordeste</i>	13.112.625		16.575.614	
<i>Centro – Oeste</i>	4.525.270		5.780.820	
<i>Sudeste</i>	31.127.930		40.249.087	
<i>Sul</i>	6.499.555		8.491.375	

Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2021.

As regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste já alcançaram índice de cobertura de coleta superior à média nacional, já as regiões Norte e Nordeste apresentam pouco mais de 80%, o que significa que em torno de 20% dos resíduos gerados não são alcançados pelos serviços de coleta regular nos municípios, Figura 3, (ABRELPE, 2021).

Figura 3 - Índice de cobertura de coleta de RSU no Brasil e regiões em 2020

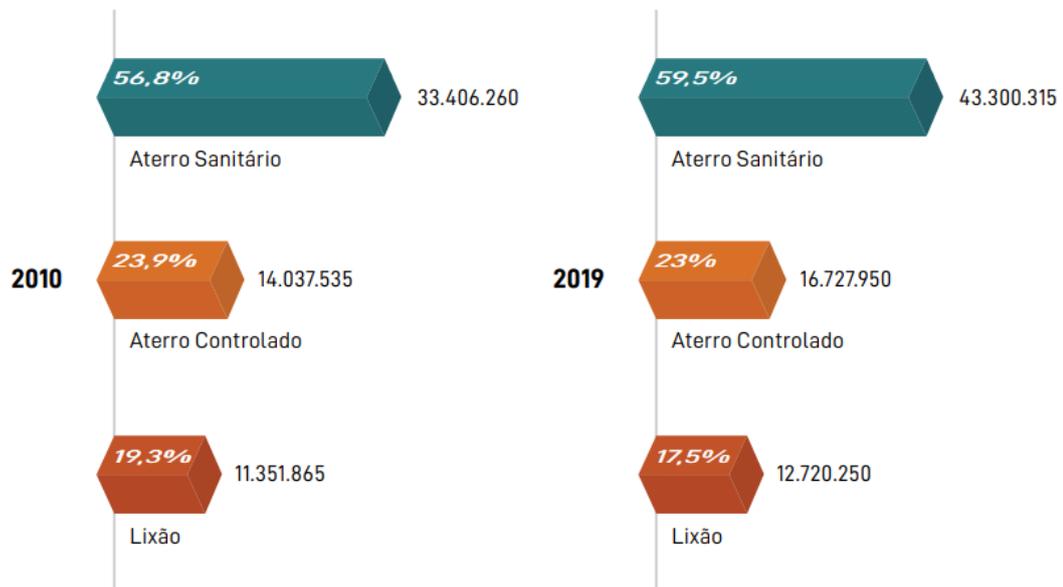


Fonte: ABRELPE, (2021).

A disposição final adequada de RSU registrou um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década, passando de 33 milhões de toneladas por ano para 43 milhões de toneladas. A quantidade de resíduos que são destinados para disposição inadequada, lixões e aterros controlados, também cresceu, passando de 25 milhões de toneladas por ano para 29 milhões de toneladas por ano. (ABRELPE, 2020).

apresenta a disposição final dos resíduos sólidos no Brasil por tipo de destinação de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

Figura 4 - Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (t/dia)

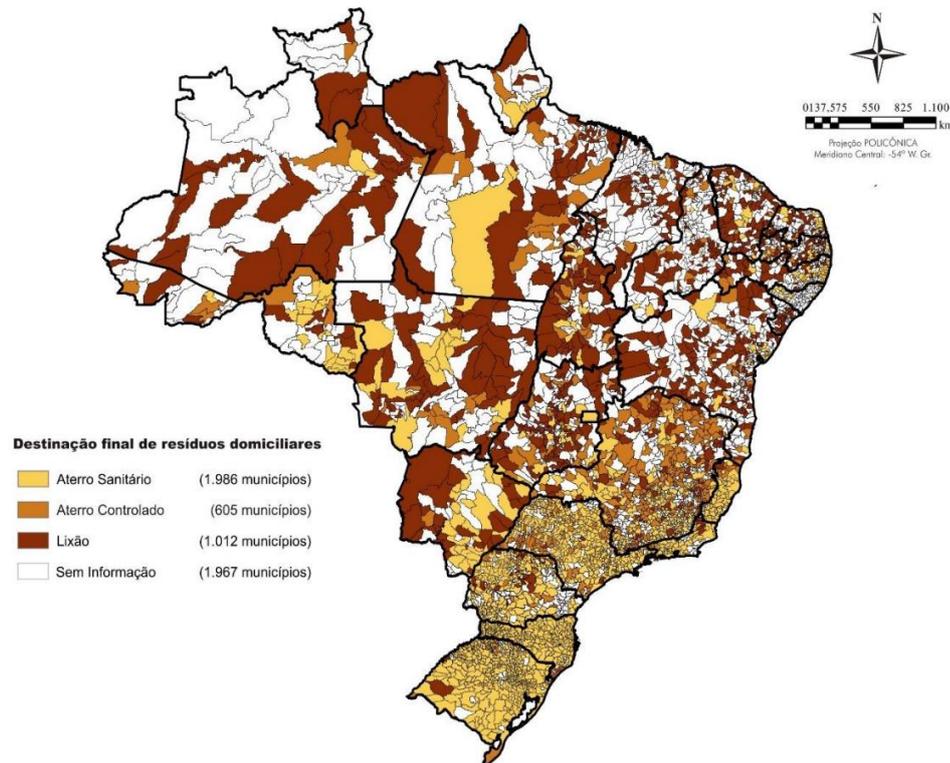


Fonte: ABRELPE (2020).

Um dos grandes vilões da disposição final dos resíduos são os Lixões, uma forma inadequada de disposição final, que se caracteriza pela simples descarga do lixo sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (SANTANA, 2016). A forma ambientalmente adequada de se descartar os RSU é através de Aterro Sanitário, que dispõe de critérios de engenharia e normas operacionais para acondicionamento e controle da poluição ambiental.

Na Figura 5, é possível identificar os tipos de unidades de destino de resíduos sólidos utilizadas pelos municípios, sendo: em amarelo os aterros sanitários, em laranja os aterros controlados e em marrom os lixões a céu aberto. A região Sul e Sudeste são as que contêm maior número de aterros sanitários em relação ao número de lixões, já a região Nordeste possui em sua maioria unidades de disposição de resíduos sólidos inadequadas. Também é possível verificar que no estado de Alagoas não há mais formas inadequadas de disposição final de resíduos.

Figura 5 - Espacialização do tipo de disposição final utilizada nos municípios



Fonte: SNIS, 2018.

Com o aumento populacional, da geração de resíduos e o crescimento das cidades, o grande desafio da limpeza urbana não está apenas na remoção dos resíduos dos logradouros e edificações, mas, principalmente, em dar um destino final ambientalmente adequado aos materiais coletados.

No ano de 2015 foi lançado um plano com 17 objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas como um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade com objetivo de atingir as metas até 2030 (BRASIL, 2015). Os objetivos são: 1 – Erradicação da Pobreza; 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável; 3 – Saúde e Bem-Estar; 4 – Educação de Qualidade; 5- Igualdade de Gênero; 6 – Água Limpa e Saneamento; 7 – Energia Limpa e Acessível; 8 – Trabalho de Decente Crescimento Econômico; 9 – Inovação Infraestrutura; 10 – Redução das Desigualdades; 11- Cidades e Comunidades Sustentáveis; 12 – Consumo e Produção Sustentável; 13 – Ação Contra a Mudança Global; 14 – Vida na Água; 15 – Vida Terrestre; 16 – Paz, Justiça e Instituições Eficazes; 17 – Parcerias e Meios de Implementação.

Dentre os objetivos o item 12.5, fala sobre reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. Em consonância com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, muitas empresas vêm adotando o Programa Aterro Zero, com a finalidade de se evitar a destinação final de resíduos para aterros sanitários, através do seu reaproveitamento através de reciclagem ou combustíveis. No entanto ainda há a preocupação com os rejeitos que ainda devem ter um destino em aterro sanitário.

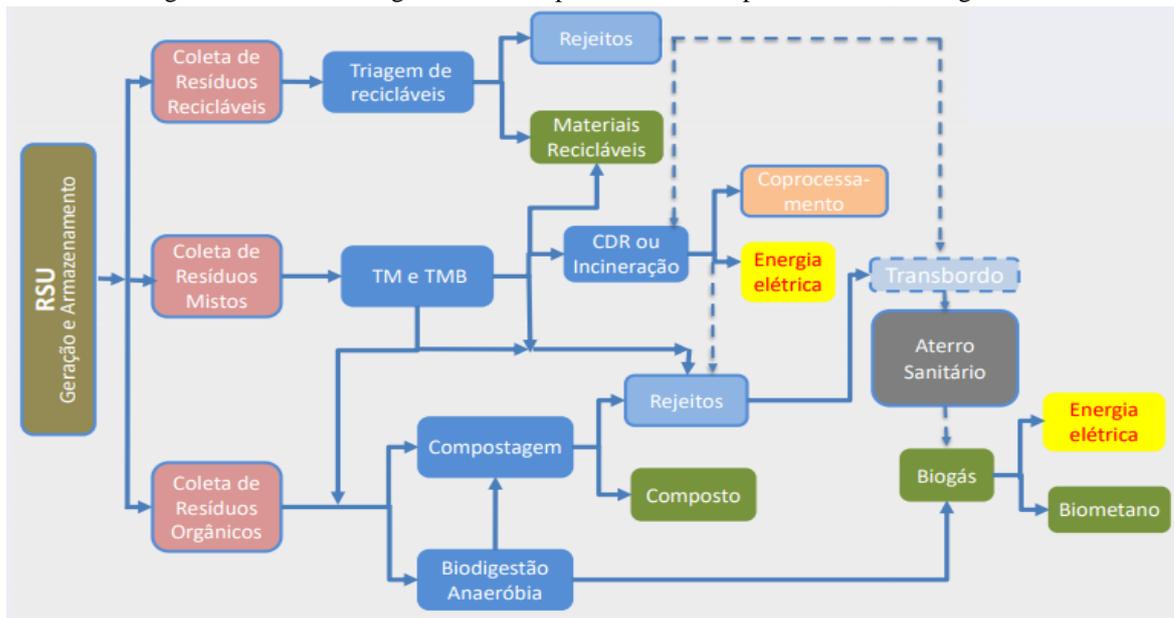
De acordo com Magalhães (2018), por mais que se tenha um sistema efetivo de gerenciamento de resíduos, com altas taxas de reciclagem e compostagem, a disposição de resíduos em aterros é inevitável, pois ainda haverá resíduos misturados que não foram separados na fonte e terão como destino os incineradores, que por sua vez, produzirão escórias e cinzas que terminarão em aterros sanitários.

Desenvolver estudos de rotas tecnológicas desde a geração dos resíduos até seu destino final, tomando como princípio o conceito da sustentabilidade, com base em critérios econômicos, sociais e ambientais, pode se tornar uma ferramenta importante na otimização da gestão, visando o maior aproveitamento dos materiais descartados e de tecnologias de tratamento, com ou sem valorização energética (FARIAS, 2018).

As rotas tecnológicas são conjuntos de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos desde a sua geração até a sua disposição final, envolvendo circuitos de coleta de resíduos de forma indiferenciada e diferenciada e contemplando tecnologias de tratamento dos resíduos com ou sem valorização energética (REICHERT, 2019). Apesar de todas as tecnologias para tratamento de resíduos, o aterro sanitário acaba sendo a disposição final dos rejeitos gerados em todas as rotas.

A Figura 6 apresenta exemplo de rota tecnológica, com implantação de três tipos de coletas e aproveitamento de orgânicos e nela pode-se ver que sempre haverá rejeitos, independentes do sistema de tratamento, que precisam ser destinados ao aterro sanitário.

Figura 6 - Rota tecnológica com três tipos de coletas e aproveitamento de orgânicos



Fonte: REICHERT, 2019.

3.2 Panorama dos RSU no Estado de Alagoas

Segundo dados da ABRELPE (2014), o estado de Alagoas gerou 2.807 toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos no ano de 2012 e no ano de 2013 foi gerado 3.024 toneladas por dia, apresentando um crescimento de 7,7% de 2012 para 2013. Já o crescimento populacional foi de 4.27%. A geração média per capita de RSU, para o ano de 2013, foi de 0,91. A Tabela 2 fornece os dados da geração e coleta de resíduos sólidos no estado de Alagoas.

Tabela 2 - Geração de RSU no estado de Alagoas

<i>População Total</i>		<i>RSU Gerado (t/dia)</i>	
<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>
<i>3.165.472</i>	<i>3.300.935</i>	<i>2.807</i>	<i>3.024</i>

Fonte: ABRELPE, 2014.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNSR impôs prazos para encerramento dos lixões em todo o Brasil até o ano de 2014, recomendando a implantação de aterros sanitários. No entanto, em 2014 apenas a capital, Maceió, vinha destinando corretamente os resíduos sólidos, que havia iniciado no ano de 2010.

De acordo com dados da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH – AL), em 2018 todos os lixões a céu aberto localizados nos municípios foram encerrados, o que fez com que Alagoas fosse o primeiro estado do Nordeste e o terceiro estado do país a alcançar este feito.

Ainda segundo a SEMARH (2018), para alcançar esse marco histórico com o cumprimento da Política Nacional foram criadas a Lei 7749 de 13/10/2015, que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e Inclusão Produtiva, além do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS-2016) e Planos Intermunicipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PIGIRS).

Após a elaboração do Plano Estadual de Regionalização da Gestão dos Resíduos Sólidos do Estado de Alagoas foram definidas sete regiões de planejamento para resíduos sólidos, as quais serviram de base para a constituição de consórcios públicos no estado de Alagoas (ALAGOAS, 2020).

Conforme Decreto nº 6.017, de 17 de janeiro de 2007, que regulamenta a Lei nº 11.107, consórcio público é definido como:

Pessoa jurídica formada exclusivamente por entes da Federação, na forma da Lei nº 11.107, de 2005, para estabelecer relações de cooperação federativa, inclusive a realização de objetivos de interesse comum, constituída como associação pública, com a personalidade jurídica de direito público e natureza autárquica, ou como pessoa jurídica de direito privado sem fins econômicos.

A Tabela 3 apresenta as regiões consorciadas com seus respectivos municípios, população e geração de resíduos sólidos urbanos. A Figura 7 mostra o mapa das regiões dos consórcios do estado de Alagoas.

Tabela 3 - Disposição Final dos Resíduos Sólidos no Estado de Alagoas (t/dia)

<i>Região</i>	<i>Consórcio</i>	<i>Municípios Consorciados</i>	<i>População (hab)</i>	<i>Geração de RSU (t/dia)</i>
<i>Bacia Leiteira</i>	Consórcio Intermunicipal para Gestão de Resíduos Sólidos - CIGRES	Batalha, Belo Monte, Cacimbinhas, Canapi, Carneiros, Dois Riachos, Jacaré dos Homens, Jaramataia, Major Isidoro, Maravilha, Monteirópolis, Olho d'Água das Flores, Olivença, Palestina, Pão de Açúcar, Santana do Ipanema, São José da Tapera, Senador Rui Palmeira.	281.004	70,64
<i>Sertão</i>	Consórcio Regional de Resíduos Sólidos do Sertão de Alagoas - CRERSSAL	Água Branca, Delmiro Gouveia, Inhapi, Mata Grande, Pariconha, Piranhas, Olho d'Água do Casado.	162.746	56,25
<i>Agreste</i>	Consórcio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste Alagoano - CONAGRESTE	Arapiraca, Belém, Campo Grande, Craíbas, Coité do Nóia, Minador do Negrão, Estrela de Alagoas, Feira Grande, Palmeira dos Índios, Igaci, Girau do Ponciano, Lagoa da Canoa, Limoeiro de Anadia, Maribondo, Olho d'água Grande, Quebrangulo, São Sebastião, Taucarana, Tanque d'Arca e Traipu.	637.995	283,18
<i>Zona da Mata</i>	Consórcio Regional de Resíduos Sólidos da Zona da Mata Alagoana - CORSZAM	Atalaia, Branquinha, Cajueiro, Capela, Chã Preta, Ibateguara, Mar Vermelho, Murici, Paulo Jacinto, Pindoba, Santana do Mundaú, São José da Laje, União dos Palmares.	264.958	121,24
<i>Sul</i>	Consórcio Intermunicipal do Sul do Estado de Alagoas - CONISUL	Barra de São Miguel, Boca da Mata, Campo Alegre, Coruripe, Feliz Deserto, Igreja Nova, Jequiá da Praia, Junqueiro, Penedo, Piaçabuçu, Porto Real do Colégio, São Brás, São Miguel dos Campos, Teotônio Vilela.	433.960	190,89
<i>Litoral Norte</i>	Consórcio Intermunicipal de Desenvolvimento da Região do Litoral Norte de Alagoas - CONORTE	Campestre, Colônia Leopoldina, Flexeiras, Jacuípe, Japaratinga, Jundiá, Maragogi, Matriz de Camaragibe, Novo Lino, Porto Calvo, Porto de Pedras, São Miguel dos Milagres.	175.996	80,88
<i>Metropolitana</i>	Consórcio Regional Metropolitano de Resíduos Sólidos de Alagoas	Barra de Santo Antônio, Coqueiro Seco, Marechal Deodoro, Messias, Paripueira, Pilar, Rio Largo, Santa Luzia do Norte, Satuba.	238.388	140,96

Fonte: Adaptado de ALAGOAS, 2020.

de metano e dióxido de carbono, que é produzido a partir de matéria-prima, como biossólidos, esterco de gado e materiais orgânicos úmidos (ROGOFF & SCREVE, 2019).

A DA consiste em um conjunto de processos metabólicos complexos e sequenciais que ocorrem na ausência de oxigênio livre e dependem da atividade de grupos de microrganismos para promover a fermentação estável da matéria orgânica principalmente em metano e gases de dióxido de carbono (MADSEN *et al.*, 2011).

A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos digere carboidratos, proteínas e gorduras. O processo é influenciado diretamente por parâmetros, como temperatura, pH, concentração de ácidos graxos voláteis (AGV), de amônia, de nutrientes, entre outros. É importante manter tais parâmetros em níveis apropriados por um longo tempo de operação para que o processo seja eficiente com uma elevada redução nos contaminantes orgânicos e produção de biogás (CHERNICHARO, 2007; ZHANG *et al.*, 2014; WOON & LO, 2016; GUERI *et al.*, 2017).

Xu *et al.* (2018) revisam criticamente alguns progressos recentes da pesquisa e desenvolvimentos inovadores na solução desafios na DA de desperdício de alimentos, a fim de identificar as necessidades futuras de pesquisa e promover uma ampla aplicação desta tecnologia.

Magalhães (2018) cita que a utilização dos processos anaeróbios para o tratamento de resíduos possui várias vantagens sobre os processos aeróbios, tais como:

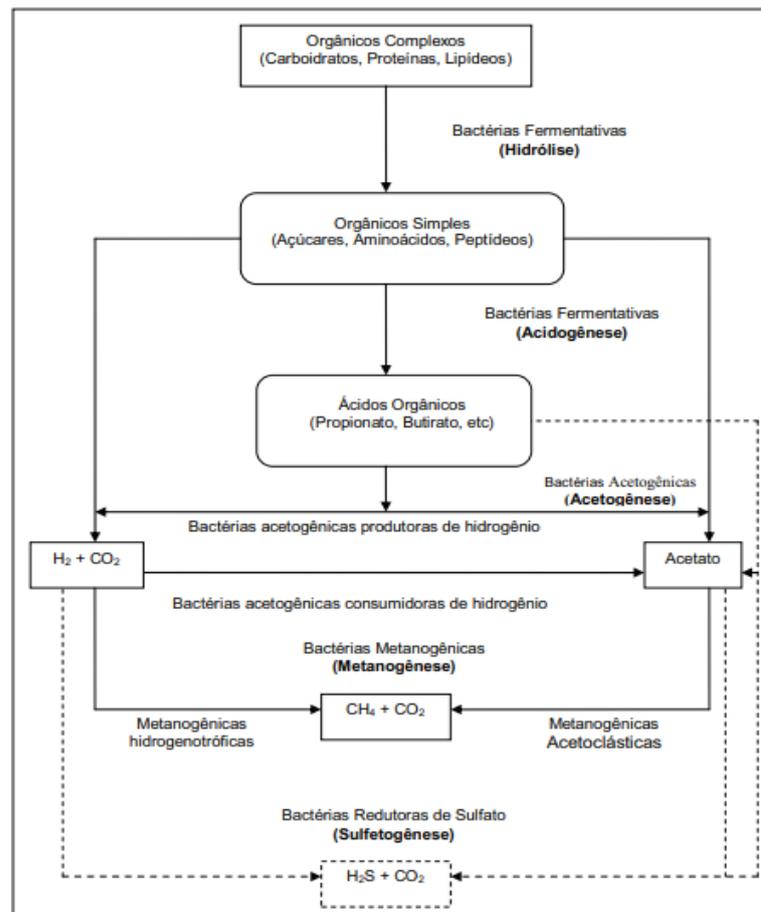
- ✓ Aumento da vida útil dos aterros sanitários;
- ✓ Retirada da fração orgânica dos RSU que é a fração que resulta em odores desagradáveis e geração de lixiviados de alta carga nos aterros;
- ✓ Minimização da emissão de gases que aumento o efeito estufa;
- ✓ Possibilidade de coleta de todo o biogás gerado (em aterros o índice de recuperação é de 30 a 40%);
- ✓ Geração de produtos valorizáveis: biogás (energia e calor) e composto;
- ✓ Poucos requisitos nutricionais para a fase de fermentação;
- ✓ Baixo ou nenhum gasto de energia;

- ✓ Aplicação de elevadas cargas orgânicas;
- ✓ Não necessita de uma área grande para ser implementado;
- ✓ Os microrganismos podem ser preservados sem serem alimentados por mais de um ano sem grave degradação de sua atividade, o que é muito importante quando o tratamento é aplicado em resíduos provenientes de atividades sazonais;

3.3.1 Etapas da digestão anaeróbia

A Figura 8 ilustra um resumo das etapas que constituem o processo de digestão anaeróbia e os grupos microbianos envolvidos.

Figura 8 - Rotas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Chernicharo, 1997.

A primeira etapa na digestão anaeróbia é a hidrólise dos polímeros de cadeia longa, realizada pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Como as bactérias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, ocorre a hidrólise de materiais particulados complexos em

materiais dissolvidos mais simples. Polímeros como proteínas, gorduras e cadeias longas de carboidratos são hidrolisados em monômeros como aminoácidos, ácidos graxos de cadeia longa e açúcares. A hidrólise destes polímeros complexos, alguns dos quais são insolúveis, é catalisada por enzimas extracelulares que são excretadas pelas bactérias fermentativas, tais como proteases e lipases (TUNES, 2017; HARYANTO et al., 2018;).

Na segunda etapa, chamada de acidogênese, os produtos solúveis do passo de hidrólise são metabolizados no interior das células de bactérias fermentativas, em compostos mais simples que são subseqüentemente segregadas por um grupo diversificado de bactérias, a maioria dos quais é anaeróbio obrigatório. Os compostos de cadeia curta produzidos incluem os AGV's (ácido acético, fórmico, propiônico, butírico e láctico) álcoois, o dióxido de carbono, hidrogênio, amoníaco e sulfeto de hidrogênio, e ainda novas células bacterianas (MAGALHÃES, 2018)

Durante a acidogênese, os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples que são excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. A acidogênese é realizada por um grupo diversificado de bactérias anaeróbias obrigatórias em sua maioria. Entretanto, algumas espécies são facultativas e podem metabolizar a matéria orgânica por via oxidativa, utilizando oxigênio molecular como acceptor de elétrons, removendo, eventualmente, resíduos de oxigênio dissolvido no sistema e, dessa forma, eliminando qualquer efeito tóxico aos microrganismos estritamente anaeróbios, dentre eles, as arqueas metanogênicas (ABREU, 2007; SIQUEIRA, 2008)

Na terceira etapa, a acetogênese, ocorre à conversão dos produtos gerados na acidogênese em acetato, H_2 e CO_2 , compostos que formam os substratos para a produção de metano. É a etapa essencial na conversão de compostos intermediários (principalmente propionato e butirato) em ácido acético. Os micro-organismos acetogênicos são denominados de sintróficos, pelo fato de sua existência depender da atividade de microrganismos consumidores de hidrogênio. As reações acetogênicas não são termodinamicamente favoráveis nas condições padrão, mas ocorrem espontaneamente em reatores anaeróbios devido à interação de micro-organismos acetogênicos e metanogênicos (CHERNICHARO, 2005).

Cerca de 70% da DQO digerida é convertida em ácido acético, enquanto os outros 30% restantes da DQO estão concentrados no hidrogênio formado. Ademais, a formação de acetato

a partir de propionato e butirato é termodinamicamente desfavorável, isto é, não ocorre de forma espontânea a não ser que essas espécies químicas (acetato e hidrogênio) sejam retiradas do meio, para assim deslocar o equilíbrio da reação no sentido da formação desses produtos (CHERNICHARO, 2005).

A quarta etapa, a metanogênica, é a etapa final do processo anaeróbico, e para a produção de gás metano dois grupos de arqueas metanogênicas atua sobre os produtos gerados nas fases anteriores. As arqueas metanogênicas acetoclásticas são responsáveis pela produção de 70% de metano do processo e possui como fonte de energia os ácidos acéticos para produzir metano e gás carbônico. As arqueas metanogênicas hidrogenotróficas produzem cerca de 30% do metano do processo, tendo o hidrogênio como fonte de energia e o gás carbônico como acceptor de elétrons, convertendo-o numa maior energia e gerando metano a partir dessa reação (GOIS, 2017).

De acordo com Magalhães (2018), quando o material de entrada contém quantidades elevadas de açúcares, a hidrólise faz com que a degradação seja muito rápida, como também acontece na fermentação. As bactérias metanogênicas formam o metano lentamente e ainda degradam os ácidos graxos. As bactérias formadoras de metano não têm tempo para degradar os ácidos graxos na mesma proporção em que são formados, ocorrendo à acumulação desses ácidos.

Durante a sulfetogênese, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de bactérias redutoras de sulfato. A redução de sulfato pode ser um processo indesejável, caso o objetivo seja a otimização da produção de metano, pois as BRS (Bactérias Redutoras de Sulfato) competem com as arqueas metanogênicas pelo consumo de acetato, H_2 e CO_2 , e o sulfeto formado, além de ser corrosivo, confere odor desagradável tanto à fase líquida quanto ao biogás, podendo ser tóxico para a metanogênese (ABREU, 2007; SIQUEIRA, 2008).

3.3.2 Fatores que influenciam a DA e a geração de metano dos RSU em aterros sanitários

A influência de fatores na digestão anaeróbia ocorre basicamente de três formas: provocando desequilíbrios entre as populações bacterianas envolvidas no processo, afetando o seu rendimento e a velocidade do processo (DE SOUZA, 1984).

Os fatores ambientais que influenciam a digestão anaeróbia envolvem, principalmente, temperatura, pH, alcalinidade, macronutrientes adequados (nitrogênio, fósforo e fosfato) e micronutrientes (traços de metais), tempo metabólico adequado e uma fonte de carbono (para

síntese e energia). A produção máxima ocorre quando estes parâmetros são escolhidos entre a faixa ótima (MORAES, ZAIAT e BONOMI, 2015; NOGUEIRA et al., 2015).

De acordo com Melo (2010), os principais fatores que influenciam na produção de biogás, e metano, em um aterro sanitário são o pH, a composição dos resíduos, a umidade e o tamanho das partículas determinando a superfície de contato entre os sólidos e os micro-organismos.

A eficiência global do processo de digestão anaeróbia e os teores de metano no biogás dependem fundamentalmente das condições ambientais e operacionais nos reatores anaeróbios (GUERI, 2017). Portanto, a qualidade da geração de gás metano na digestão anaeróbia está associada a diversos fatores, dentre eles, temperatura, pH, inóculo, agitação da biomassa, umidade, sólidos voláteis, dentre outros parâmetros, que podem favorecer o desequilíbrio dos micro-organismos envolvidos na biodegradação, e assim o rendimento e a velocidade do processo.

Na Tabela 4 constam as faixas ótimas de operação em relação a alguns dos principais parâmetros que interferem na digestão anaeróbia, tanto de forma geral, como especificamente nas etapas de metanogênese, hidrólise e acidogênese.

Tabela 4 - Faixa de operação ótima de alguns parâmetros do processo de digestão anaeróbia

Parâmetro	Faixa geral	Hidrólise e acidogênese	Metanogênese
pH	6,8 – 7,5	5,2 – 6,3	6,7 – 7,5
Temperatura (°C)	Mesofílica: 35 Termofílica: 55	25 – 35	32 – 42 50 – 58
Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)	1500 - 3000	–	–

Fonte: Adaptado de Tunes, 2017.

3.3.2.1 Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros mais significativos que influenciam a DA, porque não apenas influencia a atividade das enzimas e coenzimas, mas também influencia o rendimento de metano (ZHANG et al., 2014). Geralmente, bactérias anaeróbicas podem crescer a psicrófilo (10 a 30°C), mesofílico (30 a 40 1C) e termofílico (50–60°C).

O aumento da temperatura pode apresentar um efeito positivo na taxa metabólica dos microrganismos, acarretando em um melhor desempenho da DA. No entanto, também acarreta o aumento da concentração da amônia (NH₃) que pode levar à inibição da digestão anaeróbia (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008).

El-Mashad et al. (2004) investigou o efeito da temperatura e flutuação da temperatura na digestão anaeróbica, verificou em seu estudo que a concentração de amônia livre não afeta apenas as bactérias que utilizam acetato, mas também o processo de hidrólise e acidificação. Com isso, seus resultados mostraram uma taxa de produção de metano a 60°C menor que a 50°C em todas as condições experimentais impostas.

Sanchez et al. (2020) verificaram que a produção de nitrogênio amoniacal aumentaram 3,6 e 12 vezes quando a temperatura foi aumentada de 35 ° C para 60 ° C, conseqüentemente o rendimento de metano diminuiu.

Logo, é de grande importância o controle operacional da temperatura para um bom funcionamento do processo.

3.3.2.2 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é um parâmetro que também influencia na atividade dos microrganismos produtores de metano. Cada micro-organismo possui uma faixa específica de pH onde o seu crescimento é favorável, havendo um valor considerado ótimo, no qual a taxa de crescimento é máxima.

Os micro-organismos metanogênicos são considerados sensíveis ao pH, em que o crescimento ótimo ocorre em faixa relativamente pequena, em torno de 6,5 a 7,5 embora possam conseguir a estabilidade para a formação de metano numa faixa mais ampla de pH, entre 6 e 8 (CHERNICHARO, 2007)

A queda do pH pode ocasionar um desequilíbrio devido ao acúmulo de ácidos orgânicos. A faixa de pH ideal para o desenvolvimento dos microrganismos deve ficar entre 7 e 8,5. Valores fora dessa faixa podem ocasionar o decréscimo da produção de metano (HOLLIGER *et al.*, 2016).

Sanchez et al. (2000) verificaram o efeito do pH na cinética da produção de gás metano no processo de digestão anaeróbia. As constantes cinéticas no processo de geração de metano aumentaram 2,3 vezes quando o pH inicial do efluente aumentou de 7 para 7,6.

Zhang et al. (2010); Dai, Li, Zhang et al. (2016) analisaram os efeitos do pH no aprimoramento simultâneo da produção de metano no biogás a partir de lodos ativados por resíduos. Os resultados experimentais indicaram uma produção de metano foi significativamente aumentada em situações alcalinas de pH.

LUKITAWESA et al. (2020) investigaram o controle do pH na produção de ácidos graxos voláteis na digestão anaeróbia. Mostraram que o controle do pH durante a fase acidogênese foi importante para obter um melhor rendimento.

3.3.2.3 Inóculo

A escolha de inóculos para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos é de extrema importância para possibilitar o aumento na eficiência do processo de biodegradabilidade da matéria orgânica na digestão anaeróbia resultando em maiores rendimentos na produção de biogás.

O processo de inoculação tem como objetivo a redução do tempo de estabilização anaeróbia dos resíduos, por meio do tratamento combinado com vários resíduos com características complementares, em uma única instalação (MAGALHÃES, 2018). A degradação desses compostos orgânicos complexos por processo biológico depende do acompanhamento do ambiente favorável para o crescimento de microrganismos, como também no controle de materiais possivelmente tóxicos. Portanto é necessário propiciar o desenvolvimento de grande quantidade de biomassa microbiana com elevada atividade (CHERNICHARO, 1997).

De acordo com estudo de Liu et al (2011), em que foi visto a influência do ajuste de inóculo na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos para produção de biogás. Foram analisadas três razões (0,26; 0,36 e 0,6) no desempenho da DA, mostrando que razões maiores de inóculo pode melhorar a eficiência da digestão.

Saidu et al. (2013) estudaram a influência da adição de moinho de óleo de palma como inóculo no potencial de geração de biogás de esterco bovino e verificaram que no reator em que continha o inóculo houve uma produção de 41% de gás metano em comparação com 18% produzidos no reator sem a adição de inóculo.

Lima (2015) analisou alguns tipos de inóculos para a degradação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e observou que o lodo industrial produziu em uma quantidade maior de metano, em seguida do lodo de tanque séptico e lodo de reator estação de tratamento de esgoto (ETE) e por último lodo de lixiviado de aterro.

Dixon et al. (2019) investigaram o efeito da relação substrato/inóculo nos mecanismos de transformação bioquímica e produção de metano durante a digestão anaeróbia de fração orgânica de RSU, as relações de S/I foram 1, 2 e 3. O ensaio com relação de S/I = 1 produziu o maior rendimento máximo até o dia 37, a relação de S/I = 2 e 3 resultaram em uma maior

liberação de ácidos graxos voláteis que $S/I = 1$. Isso levou a inibição da metanogênese e menores rendimentos cumulativos de CH_4 .

3.3.2.4 Agitação

A agitação adequada do digestor é fundamental para o funcionamento ótimo do processo de digestão anaeróbia. Geralmente, os reatores são misturados para garantir a transferência eficiente de material orgânico para a biomassa microbiana ativa, para liberar bolhas de gás presas no meio e para evitar a sedimentação de material particulado mais denso (WARD et al., 2008).

Em vários estudos efetuados em digestores sob regime de agitação, verificou-se que a intensidade de agitação do líquido em digestão tem influência na inibição do processo, assim como na sua recuperação após um desequilíbrio causado por sobrecarga orgânica (MCMAHON et al., 2001; STROOT et al., 2001; VAVILIN E ANGELIDAKI, 2005).

3.3.2.5 Teor de Sólidos Voláteis

A biodegradabilidade de uma matéria-prima é indicado pelo rendimento de biogás ou metano e porcentagem de sólidos (sólidos totais ou sólidos voláteis) na digestão anaeróbica. O rendimento de biogás ou metano é medido pela quantidade de biogás ou metano que pode ser produzido por unidade de sólidos voláteis contidos na matéria-prima após submetê-lo à digestão anaeróbica por um período de tempo suficiente sob uma determinada temperatura (ZHANG *et al.*, 2007)

Segundo Zhang *et al.* (2014), a concentração de sólidos voláteis (SV) de determinado substrato também se refere ao seu teor de matéria orgânica biodegradável. Sólidos voláteis (SV) representam porção orgânica do material sólidos que podem ser digeridos enquanto o restante dos sólidos é considerado fixo. Os sólidos 'fixos' orgânicos do SV não são biodegradáveis. A taxa de carregamento real depende dos tipos de resíduos alimentados no digestor (DHAR et al, 2016).

De acordo com Firmo (2013), a utilização isolada do teor de sólidos voláteis (SV) pode levar a equívocos, pois alguns materiais apresentam elevados índices de SV e são classificados como moderadamente, lentamente ou não biodegradáveis, como os têxteis (98% de SV), plásticos (87 de SV%), borracha e couro (74% de SV), papel e papelão (81% de SV). Isto ocorre porque os

sólidos voláteis são subdivididos em sólidos voláteis biodegradáveis (SVB) e sólidos voláteis refratários (SVR), possuindo a lignina, dificilmente degradada, como exemplo de SVR.

Magalhães (2018) mostra em seu trabalho que a faixa média do teor de SV para resíduos orgânicos varia de 85,3% a 93,3%. Angelidaki *et al.* (2009) relatam que materiais com teores de STV (sólidos totais voláteis) acima de 80% apresentam excelentes perfis de biodegradabilidade e podem ser utilizados em sistemas anaeróbios. Foster-Carneiro *et al.* (2008) mostram que reatores operando com um teor de sólidos totais (ST) entre 20 a 30%, atingem produção de biogás mais efetiva e mais rica em metano, devido à presença da umidade que permite maior absorção dos nutrientes por parte dos microrganismos atuantes.

Segundo Dhar *et al.* (2016), o potencial de produção de gás geralmente pode ser estimado a partir da carga de SV do digester e a porcentagem de redução de SV através da digestão. Em seu trabalho apresentaram uma variação SV nos reatores de 76,9% a 94,2% respectivamente, mostrando que resíduos caracterizados por uma alta concentração de SV é mais adequado para a digestão anaeróbia.

3.3.2.6 Umidade

O teor de umidade é um parâmetro crucial para a degradação de resíduos sólidos em aterros sanitários, pois afeta diretamente parâmetros mecânicos químicos e hidrológicos dos resíduos (KLINK, 1982; GAWANDE *et al.*, 2003). A umidade é essencial para o processo de digestão anaeróbica porque dissolve nutrientes e substratos e ajuda na difusão do meio poroso para sítios bacterianos (LE HYARIC *et al.*, 2012).

O rendimento energético dos processos de conversão de resíduos em energia depende, além de outros fatores, da porcentagem relativa de umidade dos resíduos (FOBIL *et al.*, 2005). No campo das tecnologias de conversão de resíduos em energia o alto teor de umidade é um obstáculo, e daí vem à importância do processo de biodegradação (TOM *et al.*, 2016). Segundo Lucena (2016), deve-se ter atenção com a umidade excessiva, que pode ser prejudicial à atividade dos micro-organismos por causa do estímulo a atividade fermentativa, que pode ocasionar o acúmulo de ácidos graxos voláteis e por consequente, a acidificação do pH

Klink (1982) mostrou que o movimento da umidade através de uma amostra de resíduos sólidos em decomposição parece aumentar as taxas de geração de gás metano em 25 a 50% sobre as taxas de gás metano observadas durante o movimento mínimo da umidade, mas com os mesmos

níveis gerais de conteúdo de umidade. Os resultados são importantes na previsão do fluxo de gás e no entendimento das taxas de produção medidas de gás em aterros sanitários em larga escala, especialmente no que diz respeito aos efeitos climáticos locais.

Andreoli *et al.* (2003) afirmam que o teor de umidade deve compreender entre 60 a 90% do peso do conteúdo total, pois esta faixa alta de umidade pode facilitar a digestão anaeróbia e aumentar a geração de biogás.

Le Hyaric (2012) avaliou a influência da umidade na atividade metanogênica em um digestor de resíduos sólidos, os teores variaram de 65 a 82%. Os maiores valores da atividade metanogênica ocorreram com o teor de umidade de 82% e quanto menor o valor de água mais prejudicial para a atividade biológica, provavelmente por causa de limitações físicas.

Firmo (2013) relacionou a quantidade de água disponível com a quantidade de teor de sólidos totais existentes nos resíduos, observando a relação entre a capacidade de absorção de água dos resíduos com a classificação destes conforme sua biodegradabilidade. Notou-se que os resíduos classificados como rapidamente biodegradáveis foram aqueles que normalmente apresentaram uma relação entre 1,5 e 2,5, tais como resíduos orgânicos.

3.3.2.7 DBO e DQO

Para quantificar as concentrações de matéria orgânica total e de matéria orgânica biodegradável são realizadas as determinações da Demanda Química de Oxigênio - DQO e da Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO₅, respectivamente.

Ao final do processo de degradação espera-se obter uma redução significativa nos resultados destes parâmetros iniciais, pois eles correspondem a fatores de análise de consumo de oxigênio necessário na oxidação da matéria orgânica presente na amostra (LUCENA, 2016). Ainda, segundo a autora, a quantidade de DQO consumida durante a reação pode ser convertida em metano produzido, uma vez que o consumo da matéria orgânica ocasiona a produção deste gás em condições anaeróbias.

A relação DBO/DQO é comumente utilizada para analisar a biodegradabilidade de efluentes líquidos. Em geral, se a relação DBO/DQO for maior que 0,5, é provável que o efluente seja biodegradável e o oposto se a relação for menor que 0,5 (FIRMO, 2013).

3.3.2.8 Composição dos RSU

A caracterização dos resíduos sólidos é um processo que existe no sentido de conhecer, em concreto as quantidades e qualidade dos RSU, no sentido de estudar alternativas de uso e valorização dos resíduos.

As características da composição dos resíduos, em um aterro sanitário, podem variar em função de alguns fatores como sociais, econômicos, culturais, geográficos, climáticos, temporais, políticos, legais/normativos e sua análise pode ser realizada segundo suas características físicas, químicas e biológicas (MARTINHO, 2015; KIM, 2019).

A composição gravimétrica dos resíduos traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra analisada e alguns componentes analisados são: papel/papelão, plásticos, vidros, metais, matéria orgânica e outros. Quanto maior o percentual da fração orgânica dos RSU que chegam ao aterro, maior será o potencial de produção de gás metano.

3.3.2.9 Idade do Resíduo

Segundo Figueiredo (2012), a geração do biogás em um aterro possui duas variáveis dependentes do tempo: tempo de atraso (período que vai da disposição do resíduo até o início da geração do metano) e tempo de conversão (período que vai da disposição do resíduo até o término da geração do metano). Os resíduos novos possuem potencial de geração de metano maior, quando comparados a resíduos antigos que, em condições de umidade adequada, já passaram pelos processos de decomposição.

3.4 BIOGÁS

O biogás é uma mistura gasosa, resultante do processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica, e é considerado um recurso renovável porque faz parte do ciclo biogeoquímico do carbono. É constituído principalmente por metano e dióxido de carbono, com quantidades menores de hidrogênio sulfeto, amônia e vapor de água com traços de hidrogênio e amônia (SALOMON e LORA, 2005; ZANETTE, 2009; DAI, LI, ZHANG et al, 2016; HARYANTO et al., 2018)

Além dos efeitos negativos à atmosfera, o biogás causa grande potencial irritante, afetando os olhos e o nariz, devido ao H₂S em sua composição. A exposição direta e severa a esses gases pode causar coma imediato, convulsão e até a morte. A exposição menos intensa causa tontura,

fadiga, náuseas, tosse, diarreia, irritação na pele, dor no nariz e no peito, gastrite, dor de cabeça e danos neurológicos (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009).

Devido a essa série de agressões, ao meio ambiente e a sociedade, existem padrões que visam coibir a emissão desses gases diretamente na atmosfera, dentre eles teve início com o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris.

O Protocolo continha o comprometimento dos países industrializados e dos países cujas economias estão em transição, com metas de redução de emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa). A lógica do Protocolo de Quioto era limitar permanentemente as emissões GEE das organizações e as obrigam a elaborar soluções que sejam conciliadas com o desenvolvimento econômico com a preservação dos recursos (ANDRADE; COSTA, 2008; RIBEIRO *et al.*, 2008).

No entanto, em 2012 foi encerrado seu primeiro período de vigência, sem resultados concretos pela falta de comprometimento dos países, tornando duvidosa a sua efetividade. Mas, nem tudo foram fiascos, o Protocolo trouxe mecanismos para redução de GEE, promovendo integração entre os países, como por exemplo, o MDL que se mostrou eficaz para os países, trazendo benefícios para os países desenvolvidos ou em desenvolvimentos, além de ter significado um primeiro passo na diplomacia climática global, contribuindo para uma conscientização (ARAUJO *et al.*, 2020).

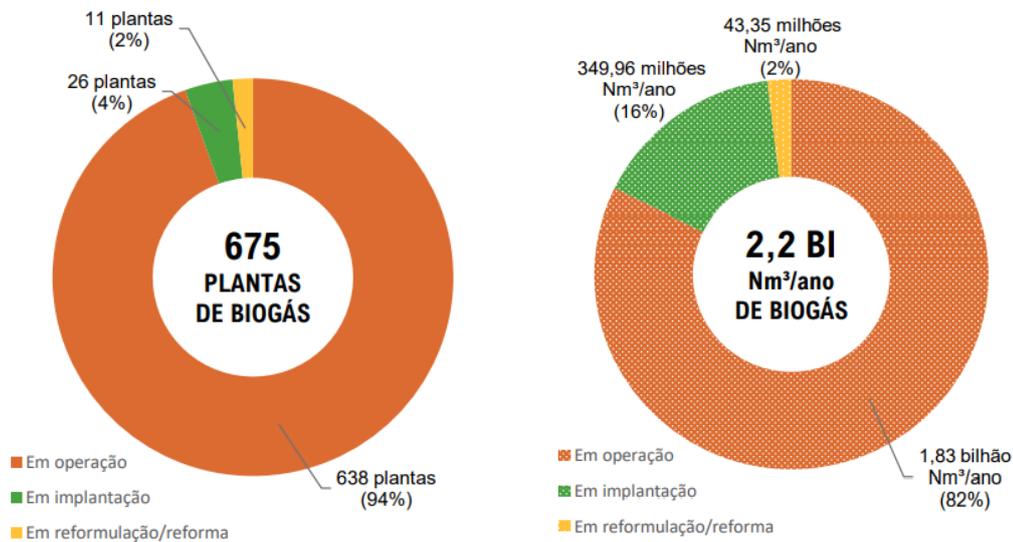
O Acordo de Paris de 2015, aprovado na COP 21 em Paris em 12 de dezembro de 2015, marca o último passo na evolução do regime de mudanças climáticas da ONU e se baseia no trabalho realizado sob a Convenção para traçar um novo curso no esforço global para combater as mudanças climáticas (UNFCCC, 2018).

O Acordo de Paris traz a certeza de que as mudanças climáticas representam uma séria advertência com efeitos irreversíveis ao planeta e reconhece a necessidade de haver fortes reduções nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) com ambição de mitigar as emissões desses gases além de propor a necessidade de acelerar a aplicação do Protocolo de Kyoto, de prestar apoio aos países em desenvolvimento, de adotar medidas de mitigação e adaptação, enfim promover a cooperação regional e internacional (ARAUJO *et al.*, 2020).

3.4.1 Panorama do Biogás no Brasil e Alagoas

Segundo Nota Técnica nº 001/2021 da CIBIOGÁS (2020), em que estabelece o panorama do biogás no Brasil, há um total de 675 plantas de biogás no Brasil, e que 638 encontram-se em operação para fins energéticos, valor que representa 94% das plantas identificadas. Houve um crescimento de 22% em comparação ao ano anterior. Em 2020 as plantas produziram 1,83 bilhão de Nm³ de biogás, Figura 9.

Figura 9 - Distribuição do número de plantas de biogás e do volume de biogás levantados em 2020



Fonte: CIBIOGÁS, 2020.

Ainda de acordo com a Cibiogás (2020), a principal fonte de substrato utilizada para produção de biogás, em sistemas de biodigestão no Brasil, é a agropecuária. As plantas que processam resíduos sólidos ou estações de tratamento representam apenas 9% das plantas em operação, no entanto são responsáveis pela produção de 73% de todo o biogás produzido no país, Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação, por origem do substrato, das plantas de biogás com fins energéticos em operação no Brasil em 2020

Substrato	Quantidade de plantas		Volume de Biogás (Nm ³ /ano)	
	Quantidade	Porcentagem	Volume	Porcentagem
Agropecuária	503	79%	203.048.019	11%
Indústria	78	12%	283.795.333	16%
Aterros e ETE	57	9%	1.342.221.982	73%

Fonte: Adaptado de CIBIOGÁS, 2020.

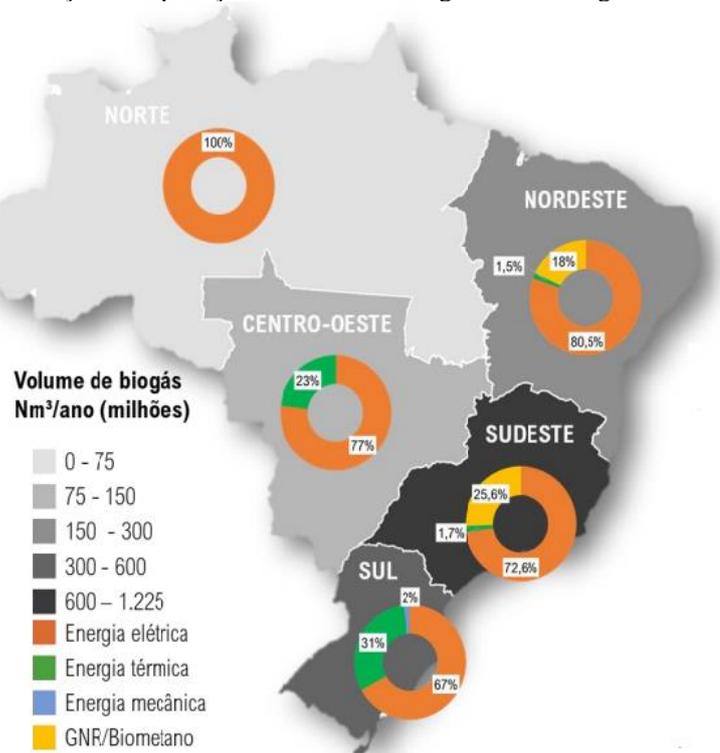
Apesar de possuírem um grande potencial energético, os resíduos sólidos dos aterros sanitários apresentam alguns entraves para aproveitamento energético de seus resíduos e por isso as

quantidades de plantas são inferiores quando comparadas com plantas industriais e de agropecuária. Um dos principais problemas está no fato de uma geração inconstante de energia, pois a geração de resíduos sofre variações em quantidade, além do tempo que leva para a geração de biogás atingir sua máxima produção e o decaimento em fase posterior (MIRANDA e NETO, 2017).

Além disso, podem-se citar também os altos valores investidos, tempo de retorno desses investimentos que é de médio e longo prazo dentro do funcionamento da vida útil do aterro. Muitos resíduos vêm deixando, ao longo do tempo, de serem destinados ao aterro para reciclagem ou reaproveitamento o que também interfere na geração de biogás e limita o tempo de existência dessa tecnologia em um aterro.

A Figura 10 e a Tabela 6 mostram que no cenário nacional, a geração de energia elétrica continua sendo a aplicação mais representativa nas regiões do país, presente em 85% das plantas de biogás e consumindo cerca de 73% do volume total de biogás produzido, enquanto que a energia mecânica é a menos representativa, com menos de 2% das plantas e localizadas apenas na região sudeste e sul (CIBIOGÁS, 2020).

Figura 10 - Distribuição das aplicações e volume de biogás em cada região do Brasil em 2020



Fonte: CIBIOGÁS, 2020.

Tabela 6 - Classificação, por aplicação energética do biogás, de plantas de biogás energéticos no Brasil

Principal aplicação energética do biogás	Quantidade de plantas		Volume de Biogás (Nm³/ano)	
	Quantidade	Porcentagem	Volume	Porcentagem
Energia Elétrica	543	85%	1.328.281.811	73%
Energia Térmica	81	13%	148.553.236	8%
Biometano	8	1%	334.704.175	19%
Energia Mecânica	6	1%	7.526.112	0,4%

Fonte: Adaptado de CIBIOGAS, 2020.

Em Alagoas ainda não há usinas de aproveitamento energético do biogás gerado. De acordo com dados da Abiogás (2021), o estado tem potencial de 2702 GWh/ano de geração de energia elétrica a partir do biogás e um total de 627,9 milhões de litros de biometano que poderiam substituir o diesel. A Tabela 7 apresenta a origem e quantidade de biogás que poderia ser aproveitado no estado.

Tabela 7 - Origem e quantidade de biogás que poderia ser reaproveitado em Alagoas

Origem do Biogás	Volume de Biogás (Nm³/ano)
Sucroenergético	538,3 milhões
Produção Agrícola	11 milhões
Proteína Animal	98,8 milhões
Aterros e ETE	29,5 milhões

Fonte: Adaptado de ABIOGAS, 2021.

3.4.2 Aproveitamento de biogás em aterros sanitários

Existem situações possíveis para o aproveitamento do biogás: o primeiro caso consiste na queima direta (aquecedores, esquentadores, fogões e caldeiras), o segundo caso é referente à conversão do gás em eletricidade, isto significa que o biogás permite a produção de energia elétrica e energia térmica (MARTINS, 2014). Além de também de poder ser utilizado em redes de gás natural como combustível para veículos.

O aproveitamento do biogás tem as seguintes vantagens: redução dos gases de efeito estufa; receita adicional para aterros existentes (energia + créditos de carbono); utilização para geração de energia ou como combustível; e redução da possibilidade de ocorrência de autoignição e/ou explosão pelas altas concentrações de metano (SOARES, MIYAMARU e MARTINS, 2017).

Os resíduos geralmente são encaminhados para aterros sanitários, onde sua degradação produz lixiviado e biogás, componentes altamente poluentes e portanto, uma solução viável para suprir a demanda por energia limpa, proporcionando o correto tratamento do RSU e mitigando a emissão de metano é a implantação de sistemas de recuperação de energia em aterros sanitários (RUOSO et al., 2022).

Ainda segundo Ruoso *et al.* (2022), a coleta de biogás para geração de energia reduz 78% das emissões de gases de efeito estufa em comparação com sua queima direta em flares de aterros. Sua recuperação gera receitas para as empresas com o uso e venda de eletricidade, energia térmica ou biometano, além de contribuir para o aumento de empregos.

No Brasil vários estudos foram realizados para analisar o aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários, que abordam a recuperação de energia de biogás, estima à taxa de metano e o potencial para produção.

Ladin e Azevedo (2008) realizaram um trabalho com objetivo de avaliar a utilização do biogás, gerado em aterros sanitários, como fonte de energia alternativa, bem como os benefícios sociais,

econômicos e ambientais daí decorrentes. Algumas das principais barreiras identificadas em seu trabalho para a implantação da tecnologia foram: a falta de garantia de que os municípios cumpram o contrato de fornecimento de lixo para geração de energia, a falta de uma política de viabilização para essa tecnologia no país e, também, a não-contabilização dos custos ambientais e da saúde na análise de viabilidade das diferentes opções tecnológicas tradicionais e alternativas para a geração de energia elétrica.

Zanete (2009) estudou o potencial de aproveitamento do biogás no Brasil para geração de energia. Os resultados apresentados em seu trabalho revelam um potencial de produção de biogás superior a 50 milhões de m³ CH₄ por dia e a viabilidade do aproveitamento energético do biogás depende substancialmente da escala dos projetos. Em geral, estes são viáveis para aterros atendem a uma população superior a 50.000 habitantes.

Souza *et al.* (2019) avaliaram a viabilidade econômica e ambiental de aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário do município de Varginha (MG), além de analisar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o uso de energia em diferentes cenários hipotéticos de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU).

Nascimento *et al.* (2019) apresentaram o estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. A pesquisa realizada mostrou que, entre 2004 e 2015, foram implantadas nos aterros de resíduos do país somente 9 usinas termelétricas, que juntas geram 86,3 MW de energia elétrica, e duas usinas que produzem biometano. Considerando as estimativas existentes, o Brasil explora somente de 7 a 20% do biogás produzido nos aterros de resíduos para fins energéticos.

Ruoso *et al.* (2022), analisaram o impacto de fatores de operação no aterro sanitário na melhoria da geração de biogás no Brasil. O estudo apresenta um modelo para medir o impacto dos diversos fatores dos aterros na produção de biogás. A modelagem dos fatores de impacto foi apoiada pelo Processo de Hierarquia Analítica (AHP), que foi empregado para construir o mapa estratégico da relação causa-efeito entre os fatores e a biodegradação. Para complementar o diagnóstico, o desempenho das empresas de biogás foi avaliado utilizando-se os Indicadores de Desempenho Chave (KPI). Os resultados da pesquisa mostraram a ordem hierárquica de impacto dos fatores operacionais que mais impactou no sistema de geração de gás metano: I) sistema de revestimento (23,8%); II) sistema de drenagem de gases (23,3%); III) gestão líquida (19,6%); IV) destinação de resíduos (15,4%); V) melhora da atividade microbiana (12,6%); e

VI) características do local (5,2%). Os fatores que mais impactaram a biodegradação foram o teor de umidade e a fração de carbono orgânico. Combinados, esses dois fatores tiveram um impacto de quase 40% no processo de biodegradação. Se os esforços não fossem concentrados nos dois primeiros fatores operacionais de forma eficaz, o desempenho da recuperação do biogás poderia se deteriorar em quase 50%. Outro fator que atingiu cerca de 20% de impacto foi à gestão de líquidos, portanto esses três aspectos juntos representam cerca de 1/3 do impacto total na produção de biogás.

De acordo com Jucá (2021), uma planta de geração de energia pode cobrir apenas uma pequena parcela da energia elétrica da cidade (5%) e os requisitos para implementação de projetos de captação de gás de aterros sanitários são:

- Sistema eficiente na gestão dos resíduos sólidos urbanos;
- Requer recursos financeiros significativos; os investimentos não são recuperados apenas pela receita da venda de energia. Eventualmente cobrem os custos operacionais;
- Aspectos financeiros e institucionais: taxas, financiamentos, receitas com a energia e fundos de carbono, etc.
- Quantidade e composição de resíduos - consórcios e evolução da MO;
- Áreas de deposição mais específicas para os resíduos orgânicos no aterro;
- Projeto adequado: sistemas de drenagem de líquidos e gases, camadas de cobertura eficientes;
- Quadro jurídico e impactos ambientais: processos licitatórios, obrigações das partes, normas e seguranças ambientais e monitoramento;
- Recursos humanos mais qualificados;

No Brasil, até o ano de 2016, foram registrados 30 projetos com potencial de gerar juntos 286,04 MW de energia elétrica, sendo que o primeiro ocorreu em 2004, no aterro sanitário Nova Gerar, em Nova Iguaçu (RJ). Estão localizados principalmente na região sudeste (20 projetos) e são responsáveis por 72% do total do potencial estimado (206,2 MW). Para a geração de biometano, existe somente o projeto do antigo lixão de Gramacho, em Duque de Caxias/RJ (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

3.4.3 Aterros de RSU com Aproveitamento para Energia Elétrica no Brasil

Um dos exemplos mais conhecidos no Brasil, do aproveitamento do biogás para geração de energia, é o Aterro Sanitário Bandeirantes, Figura 11, localizado no bairro de Perus na região metropolitana de São Paulo e desativado no ano de 2007.

A usina funciona desde 2004 e foi a primeira termelétrica nacional produtora de energia elétrica a partir do biogás gerado por RSU, em escala comercial (NASCIMENTO et al. 2019).

Possui área de 140 hectares e altura de 105 metros, tendo recebido durante sua fase de operação um total de 6500 toneladas/dia, totalizando 35 milhões de toneladas de resíduos.

Possui 24 grupos geradores Caterpillar de 925 kW cada, que proporcionam 22,2 MW de energia elétrica. Para a sua implantação, foram investidos R\$ 48 milhões (NASCIMENTO *et al.* 2019). A usina tem capacidade para produzir até 170 mil megawatts-hora de energia elétrica, suficiente para atender a demanda de uma cidade de até 400 mil habitantes.

Figura 11 - Vista aterro Bandeirantes



No município de Caieiras, estado de São Paulo, foi inaugurado em 2016 a Termoverde Caieiras que é a maior termelétrica do Brasil e uma das maiores do mundo, Figura 122.

Figura 12 - Vista termelétrica de Caieiras



Fonte: TERMOVERDE, [s.d].

A usina teve investimento de R\$ 100 milhões do Grupo Solvi. A Termoverde Caieiras tem potência instalada de 29,5 MW e gera energia limpa a partir dos resíduos depositados no aterro sanitário da Essencis. Sua produção é de 230 mil MWh ao ano, energia equivalente para atender a uma cidade de cerca de 300 mil habitantes com energia elétrica (TERMOVERDE, [s.d]). O aterro sanitário de Caieiras (Essencis) ocupa uma área total de 350 hectares e teve início de operação no ano de 2002. É o maior aterro sanitário do país com capacidade de receber até 10.625 toneladas de resíduos sólidos e industriais por dia (BRASIL, 2021).

Em Minas Gerais, o aterro sanitário da CTR Macaúbas, Figura 13, ocupa uma superfície de mais de 1.000.000 m² e entrou em operação em novembro de 2005, com previsão de operação superior a 40 anos, acumulando até hoje mais de 12.000.000 m³ de resíduos sólidos urbanos das cidades de Sabará, Belo Horizonte e outras da região. A usina, inaugurada em 2017, com capacidade instalada de 5,7 MW, permitirá a produção de 46.000 MWh/um ano de eletricidade, suficiente para atender às necessidades anuais de 25 mil famílias, e evitara o lançamento de cerca de 380.000 Toneladas de CO₂ por ano (ASJA, 2017).

Figura 13 - Usina aterro sanitário de Macaúbas – MG



Fonte: ASJA, 2017.

A Central de Resíduos do Recreio (CRR) opera no município de Minas do Leão, Rio Grande do Sul, possui 129 hectares de área, e capacidade para dispor 25 milhões de toneladas de RSU em 23 anos de vida útil. Inaugurou no ano de 2015 uma unidade de geração de energia, tendo como combustível o aproveitamento do biogás obtido da decomposição dos RSU. Possui seis motores geradores com potência de 1,426 MW cada, que produz 8,5 MW de energia elétrica (Figura 14), podendo atender uma população de aproximadamente 100 mil habitantes (CRVR, 2022).

Figura 14 - Central de Resíduos de Recreios – RS



Fonte: CRVR, 2022.

A região Nordeste do Brasil teve sua primeira usina termelétrica movida a biogás implantada no ano de 2011 no aterro sanitário de Salvador (Figura 15), com a potência de 19,73 MW, proveniente da instalação de 19 motogeradores de 1.038 KW cada, e investimentos da ordem de R\$ 50 milhões, gerando cerca de 150 MWH por ano permitindo beneficiar cerca de 200 mil habitantes (FAPESB, 2011).

Figura 15 - Usina Termelétrica – Aterro Salvador



Fonte: CRVR, 2022.

A usina explora o biogás gerado pelos resíduos do aterro sanitário Metropolitano de Salvador, que teve início em 1997, com área de 600 mil metros quadrados, atendendo cerca de três milhões de habitantes, que em média, geram 2.500 t/dia de resíduos sólidos, e foi projetado para armazenar 18 milhões de toneladas de resíduos durante sua vida útil (NASCIMENTO *et al.* 2019).

No município de Rosário, estado do Maranhão, possui uma usina de geração de energia a partir do biogás gerado no aterro sanitário da cidade (Figura 16). A usina teve investimento de R\$ 12 milhões e possui dois motores, com capacidade de 2MWH. O projeto possui foco o mercado de geração distribuída principalmente às pequenas e médias empresas, do comércio, setor de serviços ou pequenas indústrias, que podem ter acesso à energia a um custo menor. (ENC ENERGY, 2019).

Figura 16 - Central de Biogás – Aterro Maranhão



Fonte: (ENC ENERGY, 2019).

O grupo Gera, em parceria com o Santander, inaugurou no aterro sanitário de Petrolina a primeira usina de biogás do sertão de Pernambuco, no modelo geração distribuída, Figura 17. Com investimento de R\$ 6 milhões, a usina tem capacidade de gerar até 1 MWH, totalizando mais de 8.200MWH por ano, suficiente para atender até 4,3 mil residências (GERA ENERGIA, 2019).

Figura 17 - Usina de Biogás – Aterro Petrolina (PE)



Fonte: (ENC ENERGY, 2019).

A Tabela 8 apresenta algumas outras unidades de usinas termelétricas implantadas em aterros sanitários para geração de energia elétrica.

Tabela 8 - Usinas termelétricas para geração de energia elétrica.

Aterro	Município	Estado	Potência explorada (MW)	Custo (milhões de R\$)
CTR BR - 040	Belo Horizonte	MG	4,3	19,8
CTR – Zona da Mata	Juiz de Fora	MG	1,43	-
Uberlândia I/II	Uberlândia	MG	2,8	37,20
Sítio São João	São Paulo	SP	22,4	64
CGR - Guatapara	Guatapar	SP	4,2	15
Canhanduba	Itajaí	SC	1	7,5
CTR PE	Igarassu	PE	2	20
Aterro Muribeca	Jaboatão Guararapes	PE	14	30
João Pessoa	João Pessoa	PB	4,2	-

Fonte: ASJA, 2019; Adaptado de NASCIMENTO et al. 2019; JUCA, 2021.

3.5 Modelos matemáticos de gerao de gás metano

De acordo com Firmo (2013), os modelos matemáticos podem ser ferramentas importantes no planejamento e análise de sistemas e situaes reais, consistindo da representao de um determinado processo por meio de equaes matemáticas, podendo auxiliar na sistematizao das informaes, identificao dos fenmenos que podem estar envolvidos e ainda podem alertar sobre detalhes não considerados previamente, realizar análises de causa e efeito e ainda fazer previsões sobre o comportamento de um sistema real específico bem definido.

Existem diferentes métodos para calcular a quantidade de metano gerado, desde métodos que apresentam uma aproximao grosseira, considerando somente a quantidade de resíduo sólido doméstico disposto no aterro, até métodos que considerem uma cinética de gerao de biogás em funo de três tipos importantes de parâmetros: condies climáticas locais, concentrao de nutrientes no solo e composio do resíduo (MENDES e SOBRINHO, 2005).

Vários modelos foram propostos para previsão de metano durante a vida útil de um aterro. Esses podem ser divididos conforme sua ordem, os mais comumente utilizados são divididos em modelos de ordem zero, de primeira ordem, multifsico e de segunda ordem, como apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Modelos de diferentes ordens

MODELOS	CARACTERÍSTICAS
Ordem Zero	Presume-se que a formação do gás de aterro a partir de um determinado montante de resíduos torna-se constante com o passar do tempo, dessa forma, indica que a taxa de geração de metano é independente da quantidade de substrato restante ou da quantidade de biogás já produzida. É utilizado para estimar emissões em grandes escalas como níveis nacionais e internacionais, assumindo que não há alteração significativa na composição de resíduos ou na quantidade de material aterrado.
Primeira ordem	Incluem a idade do resíduo como uma variável na geração de biogás. Presume-se que a formação de gás de aterro a partir de um determinado montante de resíduos decaia exponencialmente com o passar do tempo. É o modelo de geração de gás de aterro mais utilizados nos dias de hoje pelo fato de apresentar uma maior complexidade que os modelos de ordem zero, porém com variáveis de fácil acesso.
Multifásicos	São modelos que combinam diferentes modelos de primeira ordem para expressar a geração a partir de diferentes frações do resíduo, sendo assim são modelos que devem representar mais precisamente o que ocorre em um aterro. As frações de resíduos são definidas conforme o nível de degradabilidade de vários componentes neles encontrados, tais como prontamente degradáveis, moderadamente degradáveis, lentamente degradáveis e inertes.
Segunda Ordem	Foram propostos para prever emissões de metano com base na química e na microbiologia complicadas da síntese do metano. Dado que um grande número de reações está envolvido, todos com diferentes taxas de reações, as cinéticas de segunda ordem são empregadas para prever a geração total de metano.

Fonte: Adaptado de ABELPRE (2013).

Esses modelos matemáticos para aterros sanitários são ferramentas usadas para projetar a geração de metano ao longo do tempo a partir de uma massa de resíduos aterrados. São usados para dimensionar sistemas de coleta de gás de aterro (LFG), avaliações e projeções do uso de energia de LFG e propósitos regulatórios (VOGT e AUGENSTEIN, 1997).

No entanto, os modelos atuais de geração de gás de aterro sanitário, são excessivamente simplificados, não levando em consideração variações específicas do aterro na composição de resíduos, teor de umidade e temperatura ambiente (KARANJEKAR *et al*, 2015).

3.5.1 Modelo EPA (2005)

Este modelo é normalmente apresentado para aplicação em aterros de escala real, considerando a quantidade e composição dos resíduos e biogás anualmente. O modelo da EPA (2005) é recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos para a elaboração de projetos e inventários de emissão de biogás e metano em aterros e locais de disposição final.

O modelo matemático utilizado no aterro é baseado em uma equação de decaimento de primeira ordem, que pode ser aplicada utilizando dados específicos do local, fornecidos pelo usuário,

para gerar os parâmetros necessários para estimar as emissões ou, caso não haja dados disponíveis, utilizando conjuntos de valores padrão inclusos no aterro (ABRELPE, 2013).

Segundo Firmo (2013) as equações definidas por este modelo podem ser descritas com conceitos de cinética química respeitando a lei da velocidade de primeira ordem, indicada para reações nas quais a velocidade da reação química é proporcional à concentração de um reagente.

Este modelo é simples e objetivo e pode ser usado quando se tem, pelo menos, dados relacionados à disposição dos RSU no local de destinação e composição média anual dos resíduos que chegaram ao aterro. A Equação 1 representa a equação global de geração de metano.

$$\sum_{i=1}^n Q_{CH_4} = \sum k \cdot L_0 \cdot M_i \cdot (e^{-k \cdot t_i}) \quad (1)$$

Em que:

$\sum_{i=1}^n Q_{CH_4}$: somatório da estimativa da geração de metano (m³/ano);

k: constante de geração de metano;

L₀: potencial de geração de metano dos resíduos (m³/ton RSU);

M_i: massa de resíduo depositado no ano;

t_i: idade dos resíduos depositados no ano i.

A constante de geração de metano (k) representa a taxa de geração de metano conforme decomposição de uma massa de resíduos no aterro. Essa taxa depende da composição dos resíduos, tamanho da partícula, umidade, temperatura e pH (KARANJEKAR et al. 2015).

Elevados valores de k indicam uma produção mais acelerada do gás ao longo do tempo. Em sistemas controlados, essa constante é função da umidade, disponibilidade de nutrientes para bactérias metanogênicas, pH e temperatura da massa de resíduos. Entretanto, aplicado em situações reais, esta constante varia conforme precipitação, composição dos resíduos e condições de operação do aterro (FIRMO, 2013). A Tabela 10 apresenta os valores de k recomendados na literatura para uso em modelos matemáticos.

Tabela 10 - Valores sugeridos para constante de degradação K

Autores	k (ano⁻¹)	Condição de uso
EPA (2005)	0,05 – 0,7	Relação com precipitação, classificação dos resíduos conforme composição e funcionamento do aterro. Os valores aqui apresentados são para aterros localizados em regiões com precipitação superior a 1000mm, sendo o menor valor recomendado para aterros convencionais e o valor máximo para aterros

		que funcionem como biorreatores situados em regiões de elevada precipitação e baixa evaporação.
IPCC (2006)	0,065 – 0,2	Relação com temperatura e precipitação. Esta faixa de valores é indicada para RSU, sem separação por componentes. Este modelo diferencia os valores de k para cada tipo de material também.

Fonte: Adaptado de Firmo (2013).

O potencial de geração de metano (L_0) representa a produção total de metano (m^3 de metano por tonelada de resíduo). O valor de L_0 é dependente da composição do resíduo e, em particular, da fração de matéria orgânica presente. O potencial de metano é estimado com base no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e num fator de conversão estequiométrico.

Valores típicos para esse parâmetro variam de $125 m^3$ de tonelada de CH_4 /tonelada de resíduo a $310 m^3$ de tonelada de CH_4 /tonelada de resíduo. A maior compactação do resíduo não tem efeito direto no parâmetro de L_0 . O potencial de geração de metano (L_0) de um aterro depende da composição dos resíduos e seu conteúdo orgânico degradável (KARANJEKAR et al. 2015).

3.5.2 Aplicação do Modelo IPCC (2006)

Assim como para a aplicação do modelo EPA (2005), o IPCC (2006) também necessita considerar as particularidades do aterro, realizando a entrada de dados diária dos resíduos, como quantidade, composição e parâmetros cinéticos (FIRMO, 2013).

O Modelo do IPCC (2006) é um dos modelos globais mais recentes e baseia-se na cinética de 1ª ordem para decomposição dos resíduos degradáveis considerando os diferentes componentes dos resíduos sólidos urbanos e diferentes velocidades de degradação para cada componente, e devido a isto também é chamado de modelo multicomponente (FIRMO, 2013).

Ambos os modelos são baseados na equação cinética de primeira ordem. Entretanto, a diferença existente entre eles consiste de o modelo do IPCC (2006) considerar a constante cinética de degradação (k) e o potencial de geração de biogás (L_0) diferentes para cada tipo de material existente nos RSU, enquanto que o modelo do EPA (2005) considera valores médios para todo o resíduo em geral. A equação básica para o modelo de decaimento de primeira ordem é dado pela Equação 2.

$$MCOD_i = MCO D_i^0 \cdot e^{-k_i(t-t_0)} \quad (2)$$

A quantidade total inicial de carbono orgânico degradável de cada componente i ($MCOD_i$) depositada inicialmente (no tempo $t=0$) é calculada considerando a massa total bruta dos resíduos depositada no tempo $t=0$ (W), a forma de operação do aterro (MCF), o fator de acessibilidade e de decomposição anaeróbia dos resíduos (COD_f), como pode ser observado na Equação 3.

$$MCOD_i^0 = W \cdot COD_i \cdot COD_f \cdot MCF \quad (3)$$

Em que:

$MCOD_i^0$ - quantidade de carbono orgânico depositada inicialmente no tempo $t=0$ do material i (em kg);

W - massa de resíduos que foi depositada no tempo ($t=0$) (em kg);

COD_i - teor de carbono orgânico degradável no componente i ;

COD_f - fração de carbono orgânico degradável sob condições anaeróbias (igual em todos os elementos e em geral pode variar de 0,5 a 0,7 conforme manejo do aterro ou experimento);

FCM - fator de correção do metano, que depende da forma de operação do aterro (que pode variar de 0,4 a 1).

Os dados de entrada recomendados pelo modelo para cada tipo de material com relação à fração de Carbono Orgânico Degradável (COD_i) e constante cinética de degradação (k_i) para cada material 'i' são sugeridos pelo IPCC (2006). A Tabela 11 fornece os intervalos recomendados e os valores defaults do COD modelo e na Tabela 12 são fornecidos os intervalos recomendados e valores default para os diferentes tipos de resíduos da constante K para as condições climáticas tropicais com mais de 20°C de temperatura média.

Tabela 11 - Faixas recomendadas e valores default da fração de carbono orgânico degradável (COD_i)

Tipos de resíduos	COD _i	
	Intervalo recomendado	Valor Default
Resíduos de comida	0,08 – 0,20	0,15
Resíduos de jardins	0,18 – 0,22	0,2
Papel	0,36 – 0,45	0,4
Madeira e poda	0,39 – 0,46	0,43
Têxtil	0,20 – 0,40	0,24
Fraldas	0,18 – 0,32	0,24
Lodo de estação de tratamento	0,04 – 0,05	0,05
Resíduo industrial	0,00 – 0,54	0,15

Fonte: IPCC, 2006.

Tabela 12 - Faixas e valor default das constantes de degradação (ki) nos componentes dos RSU para regiões de clima tropical

Tipos de resíduos	Precipitação média anual < 1000mm		Precipitação média anual > 1000mm	
	Faixa recomendado	Valor Default	Intervalo recomendado	Valor Default
Resíduos de comida	0.07–0.1	0,085	0,17 – 0,7	0,40
Resíduos de jardins	0.05–0.08	0,065	0,15 – 0,20	0,17
Papel	0.04–0.06	0,045	0,06 – 0,085	0,07
Madeira e poda	0.02–0.04	0,025	0,03 – 0,05	0,035
Têxtil	0.04–0.06	0,045	0,06 – 0,085	0,07
Fraldas	0.05–0.08	0,065	0,15 – 0,20	0,17
Lodo de estação de tratamento	0.07–0.1	0,085	0,17 – 0,70	0,40
Resíduo industrial	0.05–0.08	0,065	0,15 – 0,20	0,17

Fonte: IPCC, 2006.

A Equação 4, é utilizada para estimar a massa de metano obtida no processo de decomposição de materiais que compõem os resíduos sólidos urbanos

$$MCH_{4i} = MCO_{Di} \cdot \frac{16}{12} \cdot F \quad (4)$$

Em que,

MCH_{4i} - massa de carbono orgânico disponível para degradação (MCO_{Di});

16/12 - relação estequiométrica entre o metano e o carbono;

F - fração mássica de metano existente no biogás.

Wangyao *et al.* (2010) realizaram a estimativa de gás metano utilizando o modelo de resíduos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e comparou com a medição

real de campo em cinco aterros gerenciados e quatro aterros não gerenciados (lixões) na Tailândia. Foram utilizados valores default sugeridos pelo modelo para regiões tropicais e as emissões de metano do modelo IPCC produziram resultados semelhantes em comparação com as medições de campo, estimando uma quantidade de 89,22 Gg de metano liberados de locais de descarte de resíduos sólidos na atmosfera em 2006.

No trabalho de Firmo (2013) os modelos multicomponentes foram os que melhor representaram a geração de biogás em um aterro experimental. Foram feitas várias simulações com dados padrões recomendados pelos modelos LandGEM e IPCC e com dados de otimização dentro dos limites recomendados para cada região de acordo com o modelo estabelecido. Os parâmetros de entrada foram analisados em experimentos de laboratório, como BMP e reator piloto, e com os dados experimentais determinar o potencial de geração de biogás e metano.

Bianek, et al. (2017) utilizaram os modelos LandGEM e IPCC para estimativa de geração de gases no aterro municipal de Guarapuava (PR, Brasil), onde os principais parâmetros foram escolhidos com base nos dados frequentemente aplicados para cada modelo: valores default sugeridos para as condições locais específicas, para a aplicação do software LandGEM; e cálculo do potencial de geração de metano (L0) a partir da análise gravimétrica dos resíduos, para a aplicação da equação sugerida pelo IPCC. Estimou-se uma produção total de biogás de 44.466.711 Nm³. ano⁻¹ aplicando LandGEM e 60.080.906 Nm³.ano⁻¹ aplicando IPCC.

Santos, Romanel e Elk (2017) analisaram a eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros. Foram discutidas também as limitações dos modelos recomendados pelas diretrizes do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), incluindo erros intrínsecos na formulação matemática e de má interpretação no tempo para início da geração do biogás. As deficiências inerentes dos modelos IPCC (1997 e 2000) empregados

Da Silva (2020) realizou estudo que teve como objetivo estimar a geração de gás metano em um aterro localizado no município de Minas do Leão, no sul do Brasil. O volume de gás metano foi estimado usando três modelos de decomposição de primeira ordem: CdM Tool, LandGem e IPCC. A estimativa do modelo de ferramenta do primeiro modelo foi de 28x10⁵m³ de gás metano para o ano da maior geração, 2025. Enquanto para LandGem e Modelos IPCC, a geração máxima foi observada em 2026, e as estimativas de gás metano foram de 107x10⁵m³ e 23x10⁵m³ respectivamente. A Ferramenta de MDL e os Modelos do IPCC apresentaram

resultados semelhantes, revelando maior precisão e, portanto, confiabilidade. Por outro lado, o modelo LandGem superestimou a geração.

CÓRDOBA e SANTALLA (2021) propuseram uma ferramenta única para melhorar as estimativas de emissões de gases dos resíduos em aterros com base na determinação do teste de potencial bioquímico de metano (BMP) e os resultados foram utilizados para prever a emissão de metano de dois modelos, LandGEM (2005) e IPCC (2006). Os resultados das emissões de metano de longo prazo (40 anos) dos resíduos estabilizados descartados em terra mostraram superestimções de até 56,0% (modelo IPCC) e 259,5% (modelo Landgem) quando foram utilizados dados padrão, em vez do DOC real foram aplicados em resíduos estabilizados; comportamento semelhante foi observado para os resíduos brutos (23,3% e 241,3% superestimções). Além disso, o impacto do processo de estabilização revelou reduções de emissões de metano de 5,1% e 20,9% com base nos modelos LandGEM e IPCC, respectivamente.

3.6 Ensaio do Potencial Bioquímico de Metano (Ensaio BMP)

O ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) se destina a avaliar a biodegradabilidade dos resíduos com base na produção total de biogás e metano, sob condições ótimas de degradação em termos de umidade, temperatura, flora microbiana anaeróbia e disponibilidade de nutrientes (FIRMO, 2013).

O ensaio monitora o volume do biogás gerado em uma fração de resíduos sólidos urbanos, avaliando a sua capacidade de biodegradação através da produção total de CH₄. Os ensaios são monitorados através de medições constantes de pressões e temperaturas internas além da pressão ambiente. Para a realização do teste BMP, são inoculadas amostras contendo uma pequena fração de resíduo sólido, meio de cultura e inóculo (MAGALHÃES, 2018).

O ensaio de BMP é relativamente um método simples e confiável para comparação e taxa de conversão em metano. Essas propriedades podem ser levadas em consideração na avaliação dos sistemas de produção e conversão de biomassa, incluindo matéria-prima seleção; condições de crescimento, colheita e armazenamento; biogásificação; uso de gás; e processamento de resíduos (CHYNOWETH *et al.*, 1993).

Não existe padronização oficial da metodologia para realização do ensaio BMP. As formas de realização apresentam-se diferenciadas em termos de quantidade de resíduos, tamanho das

partículas, natureza dos resíduos, temperatura de incubação, tempo de realização do ensaio e outros (FIRMO, 2013).

A norma alemã VDI 4630 (2016) fornece regras e especificações para testes para determinar a produção de biogás de materiais orgânicos e produção de gás resíduo após digestão anaeróbica que servem à interpretação e otimização das plantas de biogás. Assim, dá suporte abrangente e prático relevante para a determinação da orientação do biogás de materiais orgânicos.

Segundo Alves (2008), de maneira geral, o procedimento do ensaio consiste na utilização de uma pequena fração de resíduo sólido previamente cortada e triturada, colocada em frascos de vidro e inoculada com uma fração de lodo de digestor anaeróbio de estação de tratamento de esgoto. Dessa forma, será promovida a aceleração da degradação do resíduo e mantida a viabilidade das metanogênicas. O ambiente é mantido em condições anaeróbia através da recirculação de uma mistura gasosa (CO_2/NO_2) no recipiente. O frasco é incubado por um período de tempo sob condições de temperatura pré-estabelecidas. O volume de gás é monitorado por sensores de pressão e as concentrações de CO_2 e CH_4 são obtidas por cromatografia gasosa.

Chynoweth *et al.*(1993) avaliaram o ensaio BMP em termos de inóculo, razão inóculo-alimentação e tamanho de partícula para análise da extensão e taxa de conversão de biomassa e de matérias-primas residuais em metano. Os inóculos do rúmen e do lodo exibiram solubilização semelhante de material particulado. Foi demonstrada uma razão inóculo-alimentação de 2:1 para fornecer taxas máximas de conversão e o tamanho das partículas não influenciou a taxa na faixa de 1 a 8 mm.

Li et al. (2013) investigaram o BMP e biodegradabilidade de resíduos de cozinha, palha de milho e esterco de frango, sob condições mesofílicas (37°C) em sistema batelada utilizando diferentes relações de I/S. Esses autores identificaram que a relação com teor de substrato 3 vezes maior do que o inóculo acarreta em baixo desempenho no que tange à produção de metano.

Kafle e Chen (2016) realizaram estudo para avaliar a produção de metano para uma série de razões relevantes de desperdício de alimentos e biomassa metanogênica através do Potencial Bioquímico de Metano (BMP). O lodo digestor anaeróbio foi utilizado como inóculo, e foram realizadas nas relações desperdício alimentar: inóculo de 0,42, 1,42 e 3,0 g de demanda química de oxigênio / g de sólidos voláteis. A adição de resíduos alimentares acima de 0,42 causou um

tempo de atraso para o CH₄ produção que aumentou com proporções mais altas, destacando os impactos negativos da sobrecarga com o desperdício de alimentos.

Alves (2016) realizou ensaios de BMP em misturas binárias e terciárias de resíduo orgânico e lodo de esgoto e glicerol. Os experimentos com a mistura binária (LP e glicerol) e ternária (LP, RO e glicerol) mostraram resultados positivos com relação à produção específica de metano, que aumentou 70,4% para mistura binária com adição de 1% glicerol em relação à amostra controle (somente LP). Para a mistura ternária, foram produzidos 485,79 m³biogás/tonSV e 352,20 m³CH₄/tonSV, representando aumento de 45,4% em relação à mistura de LP e RO, e acréscimo de 151,1% em relação à digestão anaeróbia do LP, sem a ocorrência de interferências na estabilização do processo. Os resultados demonstraram a viabilidade da co-digestão para o tratamento de três resíduos de elevado potencial poluidor com possibilidade do uso energético do metano produzido.

Edwiges *et al.*, (2020) realizaram uma análise do potencial de metano de resíduos de frutas e vegetais, através da avaliação da monodigestão anaeróbia semi-contínua. O BMP determinado por frascos de batelada foi de 360 NLCH₄ / kgSV , com uma biodegradabilidade de 79%. O rendimento de metano indicou o melhor desempenho com taxa de carga orgânica de 3,0 gSV L⁻¹ d⁻¹ , com 285 NLCH₄ /kgSV adicionado, atingindo 79% da BMP. Com taxa de carga orgânica acima de 3,0gSVL⁻¹d⁻¹, foi detectada uma acumulação de ácidos graxos voláteis (AGV); em particular, o ácido propiônico foi monitorado e um rendimento reduzido de metano foi detectado. A taxa de produção de biogás foi de 1,55 NL CH₄ d⁻¹ e apresentou aumento linear de acordo com os aumentos na carga orgânica.

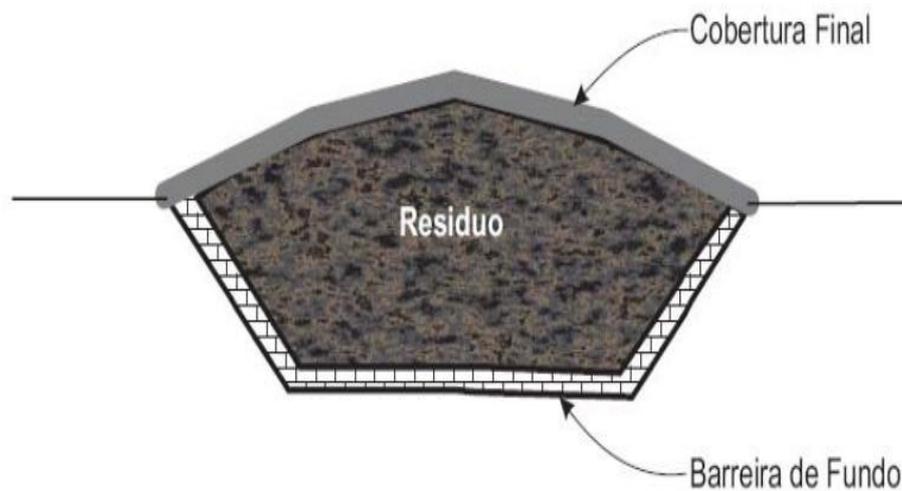
3.7 Camada de Cobertura e Emissões Fugitivas de CH₄

O sistema de cobertura dos resíduos é o principal elemento de projeto de aterros sanitários, essa camada pode evitar a entrada de água no interior da massa de resíduos e a saída de gases para a atmosfera. É considerada o elo existente entre o ambiente interno dos resíduos e a atmosfera funcionando como isolante entre a massa de resíduos e o ambiente externo. Sendo assim, de grande importância no projeto e desempenho dos aterros sanitários, revelando a importância de um correto dimensionamento e da adequada operação nos aterros (MARIANO e JUCÁ, 2010; MARIANO, 2008).

Segundo Barroso (2008), existe três condições diferentes de cobertura final, e o tipo de cobertura a ser utilizado varia em função dos objetivos a serem alcançados e da previa definição do projeto.

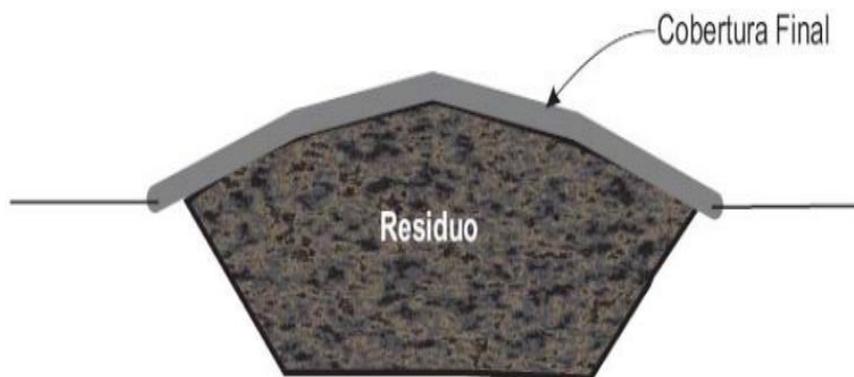
1ª – cobertura final com objetivo de controle da infiltração de água para o interior do aterro, minimizando a percolação, Figura 18;

Figura 18 - Tipo de cobertura - controle de infiltração



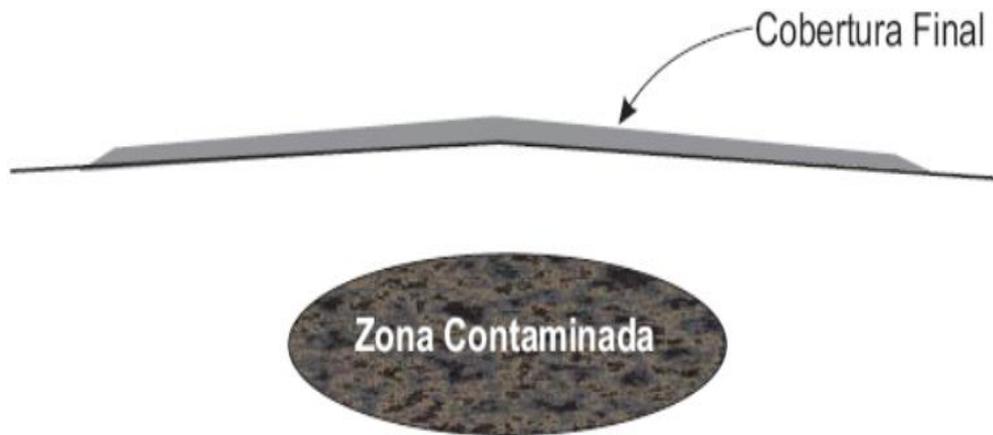
2ª – Cobertura final com objetivo de controle de liberação de gases de dentro do aterro, Figura 19;

Figura 19 - Tipos de cobertura - controle de liberação de gases



3ª - Cobertura final com objetivo de fazer a separação física entre o resíduo e o meio ambiente, visando proteção da saúde pública, Figura 20.

Figura 20 - Tipos de cobertura - separação física do resíduo com meio ambiente.



Já no sistema de cobertura convencional, os resíduos são cobertos por uma camada de solo compactado (*liner*), formando uma barreira impermeabilizante. No entanto, a *liner* está suscetível às variações das condições ambientais, que podem possibilitar a redução de sua eficiência ao longo do tempo e, conseqüentemente, ampliar o escape de gases (emissões fugitivas), mesmo quando o aterro apresenta um sistema de captação de biogás (MOREIRA et al. 2020)

Não há norma técnica que faça menção à exigência do tipo de solo, características geotécnicas, espessura e manutenção ao longo do tempo. A espessura de cada camada varia de uma situação para outra e em todos os casos uma camada de vegetação pode ser utilizada para proteção do sistema de impermeabilização do topo das células (MARIANO, 2008). A Figura 21 apresenta croquis de camada de cobertura convencionais para aterros de RSU.



Fonte: Mariano (2008).

O estudo e monitoramento das características geotécnicas do solo da camada de cobertura são imprescindíveis dentro de qualquer investigação para análise das emissões superficiais de gases e retenção de líquidos de um aterro (MACIEL, 2009).

O monitoramento das camadas de cobertura consiste numa série de ensaios tanto de campo quanto de laboratório, além do acompanhamento das condições climáticas e sua interferência no comportamento das camadas de cobertura.

A caracterização de amostras em laboratório consiste num conjunto de ensaios geotécnicos com vistas a determinar os seguintes parâmetros: distribuição de tamanho das partículas, limites de consistência, mineralogia do solo, curva de compactação, condutividade hidráulica saturada e não saturada e curva da retenção da umidade (MARIANO, 2008). A Tabela 13 apresenta de forma resumida as principais características geotécnicas da camada e seus efeitos.

Tabela 13 - Principais características geotécnicas e efeitos na emissão de gases

Características Geotécnicas	Possíveis efeitos nas emissões de gases para atm.
Tipo de solo	Solos de granulometria fina (argilas) são preferidos para controle das emissões (diminui a permeabilidade e aumenta a retenção de umidade).
Espessura	Quanto maior espessura da camada, maior a possibilidade de retenção física, química e biológica dos gases.
Umidade/Saturação	A presença de água nos vazios do solo reduz a percolação dos gases. Redução drástica para valores acima de 75% de saturação
Conteúdo volumétrico de ar	Quanto maior a presença de poros aerados na matriz, mais rápida é a velocidade dos gases no meio, conseqüentemente aumenta as emissões.
Densidade/ Compactação	O aumento da densidade dificulta a passagem dos gases (diminui a porosidade e permeabilidade) minimizando as emissões.
Sucção	Importante relação com a retenção/absorção da umidade na camada, especialmente nas evapotranspirativas.
Temperatura	A elevação da temperatura do solo favorece as emissões dos gases.
Coefficiente de permeabilidade	Coefficiente que mede a facilidade/dificuldade do gás atravessar o solo por advecção. Grandeza proporcional às emissões de gases.
Coefficiente de difusão	Coefficiente que mede a facilidade/dificuldade do gás atravessar o solo por difusão. Grandeza proporcional ao fluxo de gás emitido.
Contração/expansão e fissuras	Ciclos de umedecimento/secagem favorecem o aparecimento de fissuras em solos argilosos, aumentando os níveis de emissão.
Mineralogia	Possíveis reações físico-químicas dos minerais do solo com os gases podem retê-los na cobertura.

Fonte: Adaptado de Costa (2015).

O sistema de cobertura normalmente com espessura de cerca de 50 cm é um mecanismo utilizado nos aterros sanitários para evitar ou minimizar o escape superficial de gás metano. Essa quantidade de metano perdida é denominada de emissão fugitiva, ou seja, uma parcela de gás que não é coletada pelo sistema de captação de biogás do aterro sanitário (CANDIANI, 2020).

As emissões fugitivas são influenciadas por vários fatores, como o ambiente interno e externo aos resíduos e à camada de cobertura, tais como a profundidade e a quantidade de drenos de gases, as dimensões da célula onde os resíduos estão dispostos, a idade dos resíduos, as condições climáticas da região, a presença de fissuras na camada, as propriedades do solo e a espessura da liner (JUCÁ, 2010; MOREIRA et al. 2018).

Quantificar emissões de metano fugitivas em aterros são problemáticas devido à alta variabilidade temporal e heterogeneidade espacial dessas emissões. Além disso, a relação entre a emissão e a concentração de gás em um determinado local depende das condições meteorológicas condições e topografia local, impedindo a quantificação precisa da taxa de emissão. Assim, o desenvolvimento de métodos confiáveis e econômicos para medições de aterros emissões de metano é uma tarefa importante e um desafio para a comunidade científica (KORMI et al. 2018).

Mesmo os aterros sanitários com bons sistemas de captação do gás metano, não conseguem captar em 100% todo o gás gerado e, parcelas significativas são emitidas de maneira fugitiva a atmosfera, representando além dos impactos ambientais, perdas econômicas relacionadas a redução na recuperação e aproveitamento do gás metano, associado a sua potencial comercialização ou conversão em energia elétrica, por exemplo (CANDIANI, 2020).

A quantificação das emissões fugitivas (ou perdas) de gases pela cobertura dos aterros sanitários é um importante parâmetro a ser monitorado quando se pretende implantar (ou aprimorar) sistemas de aproveitamento energético, servindo ainda para avaliar a eficiência da camada e sistema de drenagem (MOREIRA, 2018).

Para Moreira (2020), estudo e a quantificação das emissões de CH₄ tornam-se relevantes para melhorar as estimativas de emissões de CH₄, avaliar as medidas de controle de gases de aterro e direcionar o aproveitamento energético do biogás gerado em aterros.

Silva e Freitas (2013) apresentaram estudo em que as emissões fugitivas de metano, em aterros sanitários do Brasil, variam de 16% a 35%. Candiani (2020) indica que os valores das emissões de gases pela camada de cobertura representam cerca de 22% das emissões total de CH₄ de um aterro e que os sistemas mais eficientes são capazes de captar cerca de 75% do total de gás metano em um aterro. Candiani e Viana (2017) apresenta estudo em que a emissão fugitiva foi de 31,4% do total emitido de gás metano, com eficiência de captação de 68,6%, menor que os planejados pelos gestores de aterros, que é de 75%.

A Tabela 14, apresenta alguns estudos realizados com a emissão fugitiva de metano em aterros sanitários.

Tabela 14 - Estudos com emissões fugitivas de metano em aterros sanitários

Autores	Aterros	Emissões de CH₄ gCH₄/m²/dia
Maciel (2009)	Aterro Muribeca (PE)	0 a 1.332
Sauri-Riancho et al. (2010)	Aterro de Mérida - México	0 a 6,004
Mariano e Jucá (2010)	Aterro de Aguazinha (PE)	0 a 400
Goldsmith Jr. et al. (2012)	20 aterros nos EUA	32 a 207
Audibert e Fernandes (2013)	Aterro Belo Horizonte (MG)	23,3 a 337,6
Di Trapani et al. (2013)	Aterro de Palermo - Itália	0,09 a 1.118
Scheutz et al. (2014)	Aterro de Klintholm – Dinamarca	446
Candiani e Viana (2017)	Aterro Caieiras (SP)	18,6 a 149,8
Moreira (2018)	Aterro Campina Grande (PB)	0 a 2,85
Damasceno (2018)	Aterro Metropolitano (BA)	0 a 355,55
Borba et al. (2018)	Aterro Seropédica (RJ)	0,1 a 574,6

Fonte: Adaptado de CANDIANI (2020).

Estudo realizado por Spokas et al. (2006), para verificar a eficiência da captura por sistema de coleta de gás, mostrou que cerca de 90% das emissões de metano pela camada de cobertura podem ser reduzidas com uma cobertura final adequada, a partir de geomembrana, associada com uma coleta eficiente de gases.

Moreira et al. (2020), verificaram o percentual de retenção de CH₄ acima de 95% na camada de cobertura do aterro sanitário de Campina Grande, sendo influenciado pelo elevado grau de compactação do solo no aterro, eficiência do sistema de drenagem dos gases e pelos liners, que são barreiras impermeáveis utilizadas em aterros sanitários

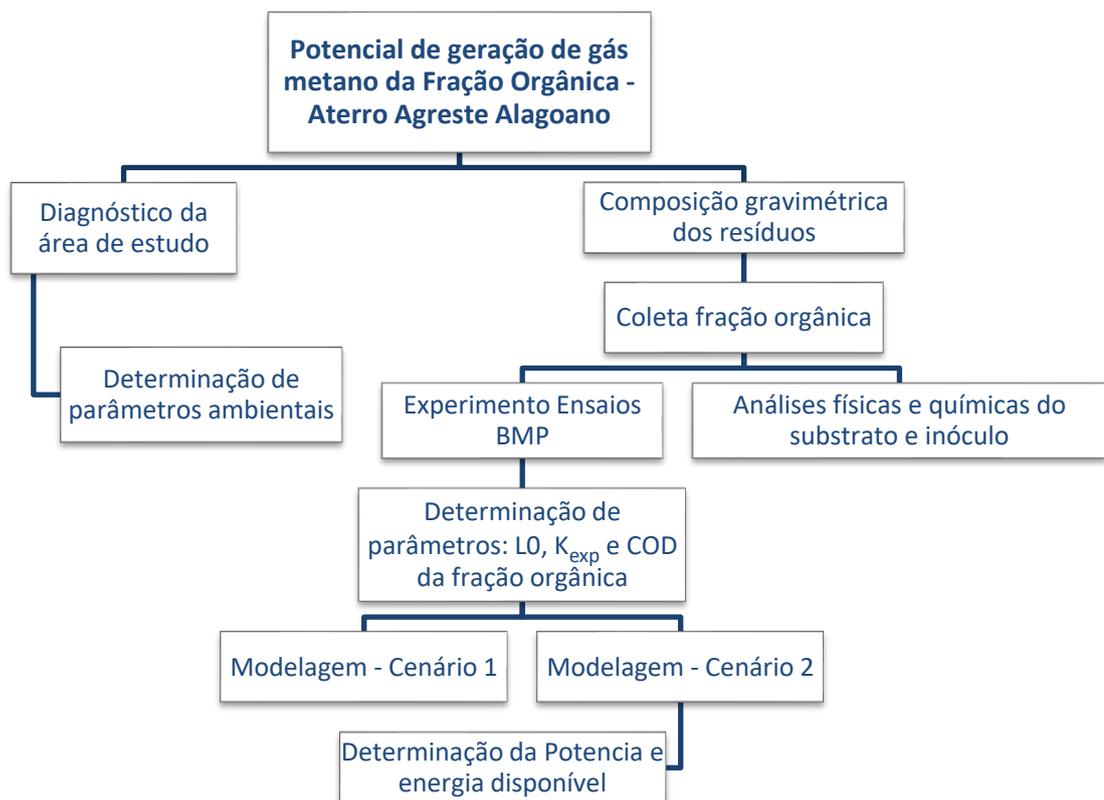
No Brasil, a cobertura do aterro sanitário com geomembrana ainda é uma questão complexa, representando muita resistência, principalmente em função dos possíveis impactos na operação e monitoramento dos aterros sanitários, porém a própria Política Nacional de Resíduo Sólido direciona esforços para ampliação do aproveitamento energético do metano nos aterros sanitários e, pesquisas, que possam avaliar os efeitos da cobertura com geomembrana nos aterros sanitários seriam fundamentais e urgentes (CANDIANI, 2020).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a identificação da área de trabalho, como foi realizado o levantamento de dados do projeto e fatores ambientais da área do aterro, e descreve a metodologia dos ensaios de campo e laboratório utilizados nesta pesquisa, para atingir os objetivos propostos, envolvendo: composição gravimétrica e volumétrica dos RSU que chegam ao aterro sanitário, ensaios de produção bioquímica de metano (PBM), modelagem matemática com modelos matemáticos e estudo do solo da camada de cobertura do aterro.

A Figura 22 apresenta o fluxograma com a sequência de ações e atividades desenvolvidas na pesquisa.

Figura 22 - Fluxograma das atividades desenvolvidas



Fonte: O autor (2022)

4.1 Identificação da área de trabalho

A área de estudo é o aterro sanitário da região do agreste do estado de Alagoas, denominado de CONAGRESTE, que fica localizado entre os municípios de Arapiraca e Craíbas, a cerca de 140 km da capital alagoana, Maceió. A Figura 23 ilustra uma vista aérea da área de estudo.

Figura 23 - Vista aérea do Aterro Sanitário do Conagreste



Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta Google Earth.

4.2 Municípios Integrantes do aterro

O aterro sanitário foi construído para atender ao Consorcio Regional de Resíduos Sólidos do Agreste Alagoano (CONAGRESTE). O consorcio é instituído por Lei Federal nº 11.107/2005, regulamentada pelo Decreto nº 6.107/2007, atualmente conta com 19 municípios integrantes. No entanto, o aterro recebe resíduos de mais 10 cidades e empresas privadas.

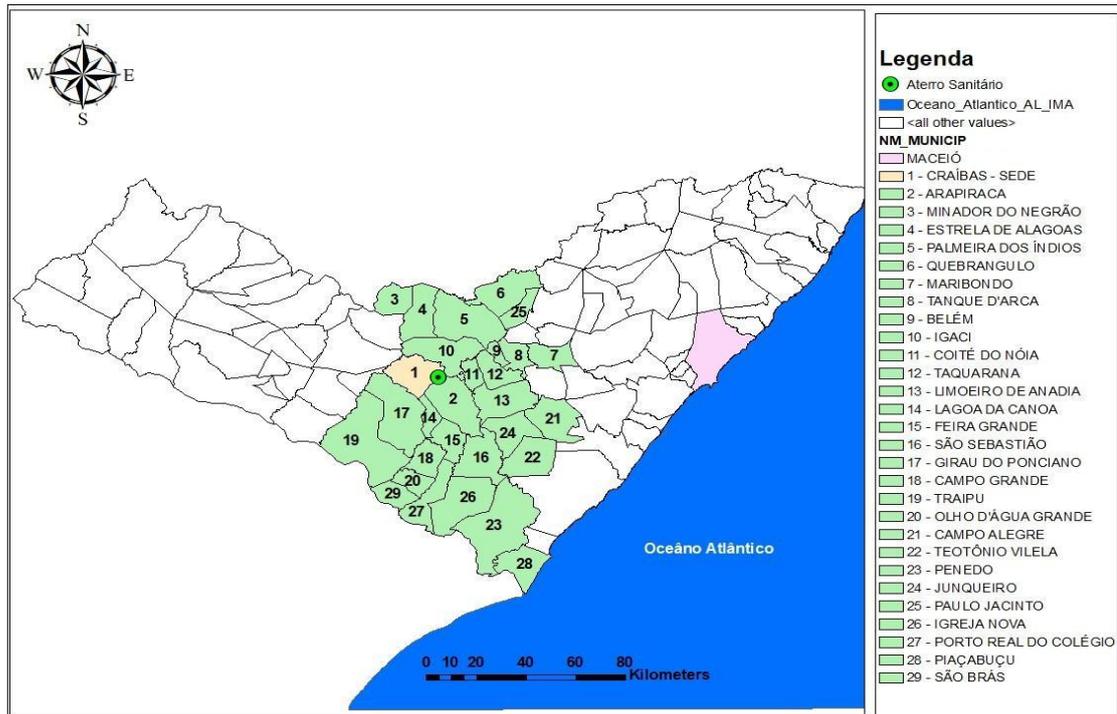
A Tabela 15 apresenta a lista de municípios e suas respectivas populações, segundo dados do censo do IBGE de 2019 e a Figura 24 mostra o mapa dos municípios que dispõem os resíduos sólidos no CONAGRESTE. Já a Tabela 16, apresenta a lista de empresas privadas que destinam os resíduos para a área e sua população total atual.

Tabela 15 - Municípios que dispõem RSU no aterro do CONAGRESTE. Dados de população de 2019

	CIDADE	População total
1	Arapiraca	234309
2	Minador do Negrão	5315
3	Estrela de Alagoas	18304
4	Palmeira dos Índios	73452
5	Quebrangulo	11202
6	Maribondo	13123
7	Tanque D'arca	6115
8	Belém	4226
9	Igaci	25.596
10	Coité do Nóia	10.594
11	Taquarana	20.162
12	Limoeiro de Anadia	28.904
13	Craíbas	24.396
14	Lagoa da Canoa	17.692
15	Feira Grande	22.192
16	São Sebastião	34.424
17	Girau do Ponciano	41.549
18	Campo Grande	9.576
19	Traipu	27.934
20	Olho D'agua Grande	5.133
21	Campo Alegre	57.997
22	Teotônio Vilela	44.570
23	Penedo	64.005
24	Junqueiro	24.716
25	Paulo Jacinto	7.556
26	Igreja Nova	24.670
27	Porto Real do Colégio	20.158
28	Piaçabuçu	17.868
29	São Brás	6.977
	TOTAL	902715

Fonte: Elaboração própria com dados populacionais estimados pelo IBGE, 2021.

Figura 24 - Mapa dos municípios integrantes do aterro do CONAGRESTE



Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta ArcGis.

Tabela 16 - Empresas privadas que destinam os resíduos para o aterro do CONAGRESTE

	Empresa
1	Industria de Laticínios Palmeira dos Índios S/A.
2	DB Pneus Ltda
3	Ciano Soluções Ambientais Ltda
4	Grupo Coringa
5	Concrenorte – Concreto Nordeste Ltda
6	Vavel Ambiental Ltda-ME
7	Coleta Soluções Ambientais
8	Ideal Locações
9	E Batista dos Santos Eireli - EPP
10	Mineração Vale Verde Ltda
11	Ciganos Motel Ltda-ME
12	F Móveis
13	Agreste Engenharia
14	Proteica Alimentos Ltda
15	Karillos Lopes Cavalcante - ME
16	Torre Empreendimento Rural e Construção Ltda
17	Associação Alética Banco do Brasil
18	Forte Ambiental
19	Standard Construções
20	Couros Bordados
21	CT Plas
22	Jose Amilton Lima da Silva
23	Jose Alexandre de Lima
24	Osacre
25	Kellison Lopes Cavalcante
26	Frigovale
27	Casa das Fraldas

Fonte: Elaboração própria a partir de dados administrativos do aterro.

4.3 Levantamento de dados de projeto e fatores ambientais da área

O levantamento dos dados de projeto do aterro levou em consideração a concepção do próprio aterro tais como sua capacidade, municípios a que atende e sua estimativa da quantidade de resíduos que o aterro deverá receber ao longo de sua vida útil. Esse levantamento foi feito a partir de dados de relatórios cedidos pela empresa responsável pela operação do aterro e consultas no site da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH/AL) que coordenou o plano de gestão de Resíduos Sólidos de Alagoas.

Os fatores ambientais da área do aterro foram levantados por meio de caracterização da área levando-se em conta sua localização, clima (temperatura e pluviometria), vegetação, relevo, bem como aspectos referentes à geologia da área, aspectos esses relevantes para a área de um aterro sanitário. O levantamento dessas informações foi obtido através de pesquisas de literatura em livros, periódicos e páginas digitais relacionadas à área de trabalho e de ferramentas de geoprocessamento.

4.4 **Caracterização dos resíduos que chegam ao aterro sanitário.**

Uma peculiaridade dos aterros consorciados é que eles recebem resíduos de municípios com populações distintas tanto em número quanto em hábitos culturais e socioeconômicos. A caracterização dos RSU de todos os municípios que compõem o consórcio, nem sempre é possível, pois demandam tempo e recursos financeiros, e nem sempre existe um caminhão de coleta específico para cada município; Por outro lado a caracterização por amostragem dificulta o estabelecimento de uma composição gravimétrica global representativa dos RSU aterrados, composição essa que influencia significativamente na geração do biogás do aterro e na aplicação dos modelos matemáticos para estimativa do potencial de produção de metano.

Diante disto foram adotados os seguintes critérios para selecionar os municípios cujas amostras de RSU que seriam caracterizadas:

- a) **População:** os municípios que compõem o CONAGRESTE foram ordenados em função de sua população total e selecionados aqueles que, em conjunto, somam um percentual de cerca de 50% da população total de todos os municípios.
- b) **Localização geográfica:** foi feito o mapeamento dos municípios que compõem o CONAGRESTE para identificar regiões cujas características geográficas poderiam influenciar na composição dos RSU. Em seguida foram marcados os municípios de maior população e verificado se cada região havia sido contemplada com, pelo menos um, município de maior população.
- c) **Questões culturais:** baseada na localização geográfica foram observados se existiam fatores culturais e socioeconômicos que justificassem essa regionalização.
- d) **Roteiro de coleta:** foi feita a identificação dos roteiros de coleta, para verificar se existiam veículos que coletavam especificamente os resíduos dos municípios selecionados.

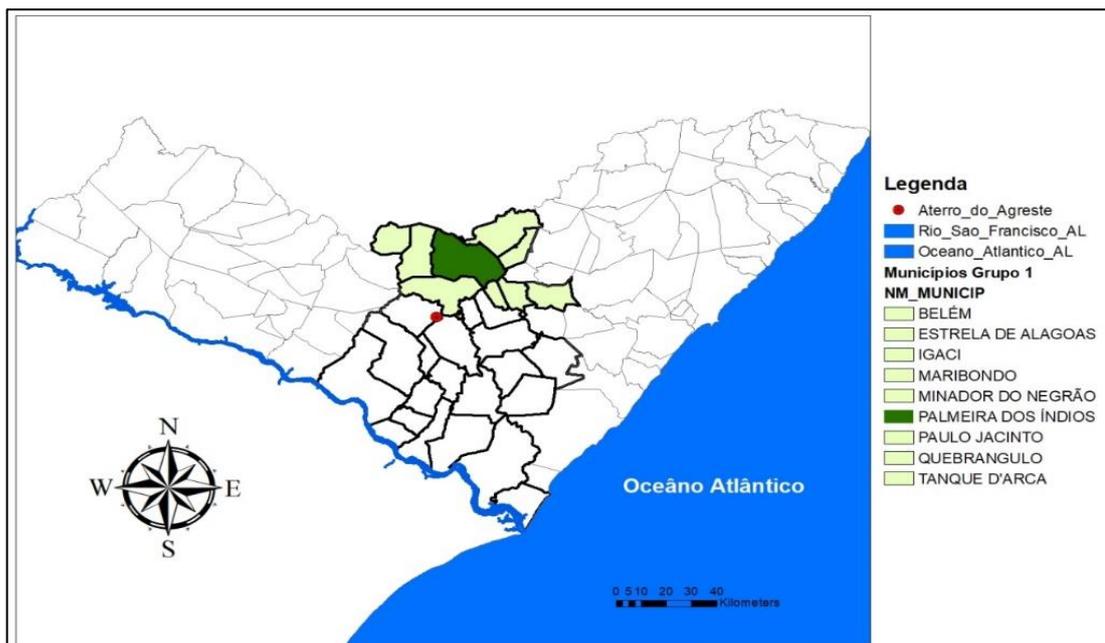
Baseado nos critérios estabelecidos, verificou-se que apenas 5 dos 19 municípios que integram o CONAGRESTE representavam cerca de 50% da população geradora de RSU: Arapiraca, Campo Alegre, Teotônio Vilela, Palmeira dos Índios e Penedo. Foi verificado, também, que esses municípios possuem veículos de coleta específicos e roteiro de coleta definidos.

Quanto à localização geográfica, dos municípios que compõe o Consórcio, se identificou que existem sete (7) municípios às margens do rio São Francisco que sofrem interferência cultural e socioeconômicas de atividades ribeirinhas. Nove (9) municípios que estão geograficamente próximos ou na fronteira com o estado de Pernambuco e que sofrem influência cultural e

socioeconômicas (IDH e renda *percapita*) dessa proximidade. Por fim, verificou-se que existem 13 municípios centrais, entre a região de fronteira com Pernambuco e os municípios ribeirinhos, entre os quais está Arapiraca, o município que possui a segunda maior população do estado de Alagoas e maior do CONAGRESTE e que por isso pode influenciar os hábitos dos municípios vizinhos.

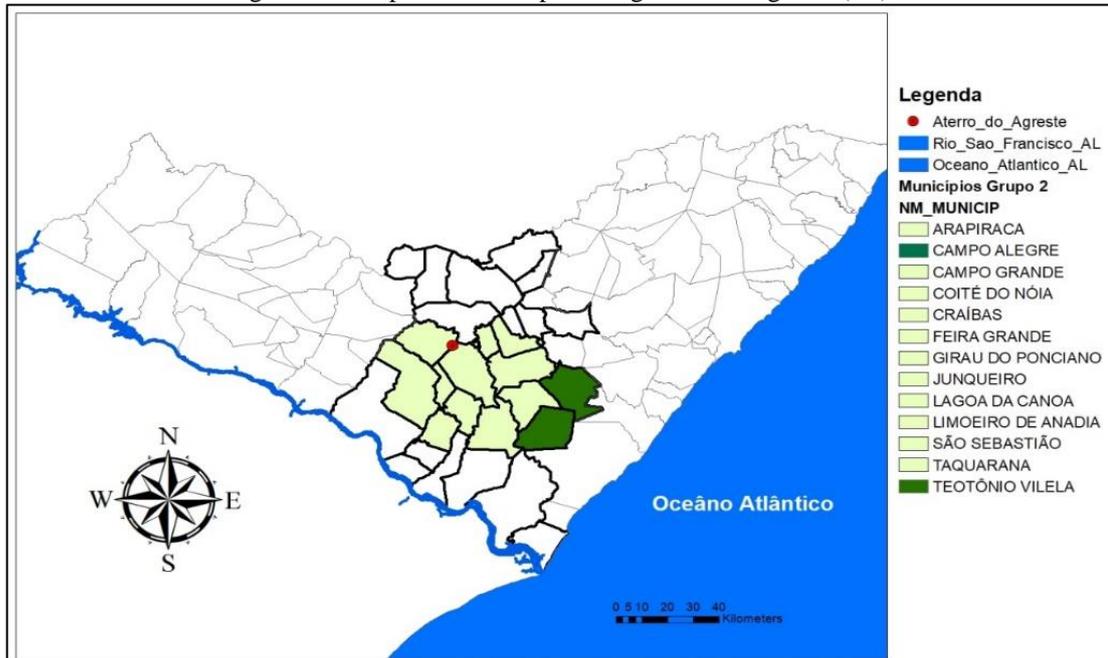
Dessa forma, foram selecionadas 3 regiões, onde a região 1 representa as cidades que estão próximas à fronteira com o estado de Pernambuco, cujo município representativo de maior população é Palmeiras dos Índios. Região 2 composta pelas cidades da região central do agreste Alagoano, representada pelos municípios de Campo Alegre e Teotônio Vilela. Região 3 composta pelas cidades ribeirinhas do Rio São Francisco, representada pela cidade de Penedo. O município de Arapiraca, por ser o mais populoso da região foi considerado isoladamente. As Figuras 25, 26, 27 e 28 ilustram essa regionalização.

Figura 25 - Mapa dos municípios integrantes da região 1(R1)



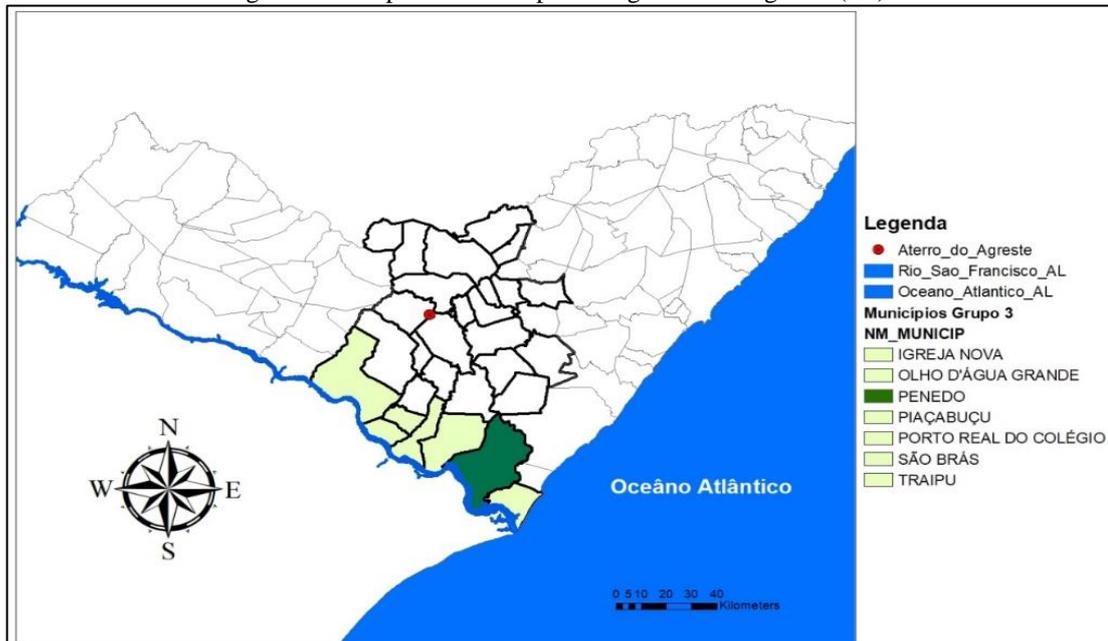
Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta ArcGis.

Figura 26 - Mapa dos municípios integrantes da região 2 (R2)



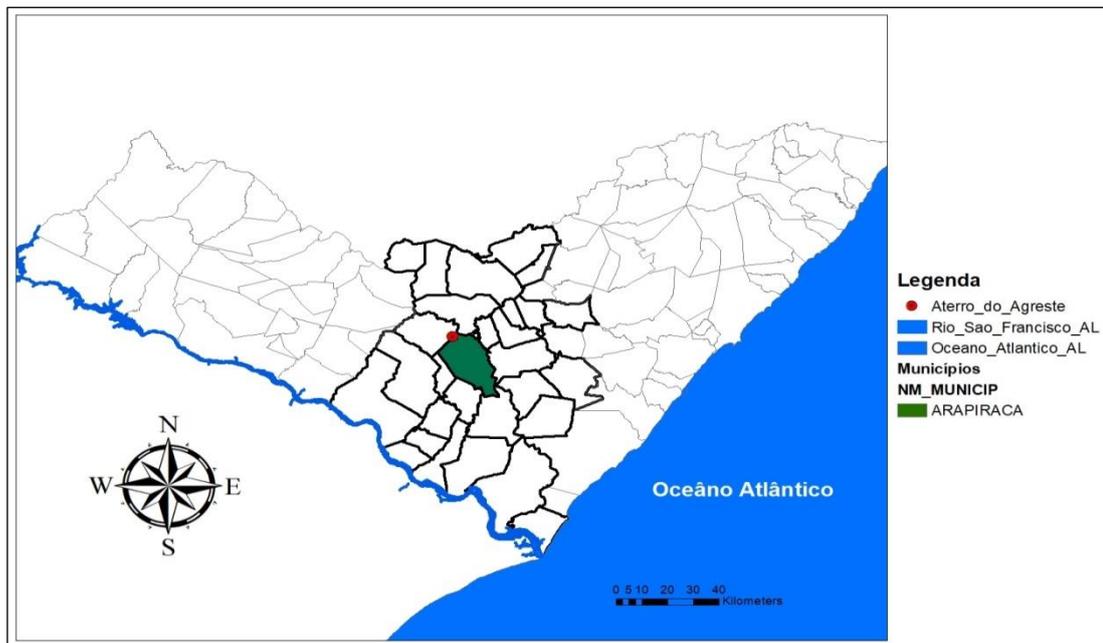
Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta ArcGis.

Figura 27 - Mapa dos municípios integrantes da região 3 (R3).



Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta ArcGis.

Figura 28 - Mapa do município de Arapiraca



Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta ArcGis.

Arapiraca é o segundo município mais populoso do estado e maior da região, localizada na região central do estado e possui uma grande influência econômica no agreste alagoano. Além disso, segundo informações do aterro, há coleta em todo o seu território, urbano e rural.

4.4.1 Amostragem e rotas de coleta

Depois de selecionados os municípios, foram definidas as rotas de coletas a serem analisadas. Por Arapiraca ser o município mais populoso, cerca de 26% do total da população do estado, e ter uma economia comercial forte, apresentando resíduos comercial e residencial em área urbana e rural, foram definidas 03 (três) rotas, levando em consideração os bairros com maior número populacional, Alto do Cruzeiro e Centro, e os bairros da Zona Rural da cidade, que representa mais de 15% da população e tipos distintos de resíduos. As regiões selecionadas para amostragem dos resíduos do município de Arapiraca são representadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Regiões de Arapiraca selecionadas para pesquisa

Bairro	Tipo resíduo predominante	População
Alto do Cruzeiro	Residencial	14.737
Centro	Residencial - Comercial	5.210
Zona Rural	Residencial - Agrossilvopastorial	34.560

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do IBGE (2010)

O bairro Alto do Cruzeiro é o mais populoso de Arapiraca e por isso possui caminhão específico. O bairro Centro foi selecionado pelo fato do município ter uma economia voltada para o comércio. Já a Zona Rural foi analisada devido ao fato do município possuir mais de 15% da sua população residindo em sítios e povoados, além de Arapiraca também possuir sua economia voltada para o setor agropecuário.

No município de Palmeira dos Índios, também possui coleta em todo o município, e por isso foram definidas 02 (duas) rotas, área urbana e rural.

Para os demais municípios apenas 01 (uma) rota. A quantidade menor de rotas para as últimas cidades se deve ao fato de que rotas em cidades menores fazem a coleta em diferentes bairros com diferentes classes sociais no mesmo caminhão.

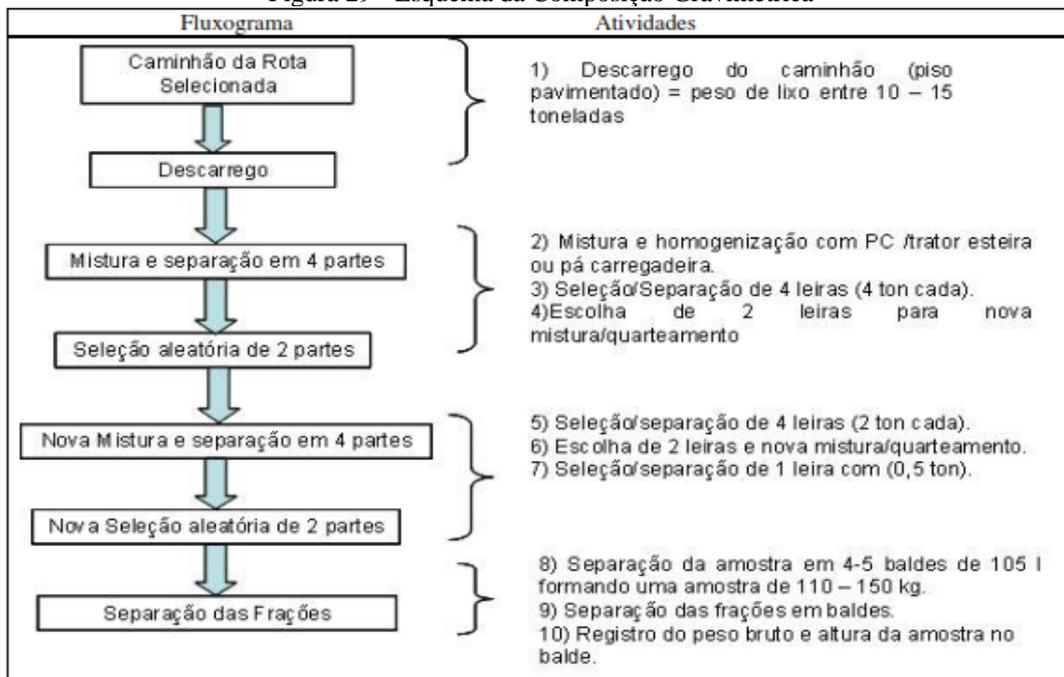
4.4.2 Caracterização gravimétrica

A caracterização gravimétrica dos resíduos que são dispostos no aterro sanitário do CONAGRESTE foi feita por meio de análises gravimétricas, realizadas na área do aterro sanitário, e análises físico-químicas realizadas no laboratório de saneamento ambiental (LSA) no Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas – UFAL.

Foram realizadas 02 análises gravimétricas para cada município selecionado, durante período seco (mês de janeiro/2020) e período chuvoso (mês de julho/2019). O estudo foi realizado dentro do próprio aterro sanitário, com amostras coletadas em função das rotas dos caminhões de coleta de resíduos por tipo de atividade desenvolvida e a logística

A metodologia aplicada foi a do quarteamento fazendo-se uma adaptação das propostas descritas por Jardim (1995) e Mariano *et al.* (2007) e após o quarteamento a separação dos materiais que compunham a amostra foi feita de forma manual. Depois de separados foi feita a pesagem do material existente na amostra. A Figura 29 apresenta esquema da metodologia adaptada para composição gravimétrica.

Figura 29 - Esquema da Composição Gravimétrica



Fonte: Mariano et al. (2007).

Para a obtenção da composição gravimétrica dos resíduos, inicialmente foi montada uma estrutura para auxiliar o desenvolvimento da análise com uma base de lona para que as amostras não sofressem interferências externas (Figura 30).

Figura 30 - Área destinada para a realização da análise gravimétrica



Fonte: O autor (2022).

O ensaio da composição gravimétrica iniciava com despejo de todos os resíduos do caminhão compactador no aterro, em seguida foram coletados de forma aleatória 400 litros de resíduos, com balde de 50L, e em seguida transportados, através de carro de mão, até a área para quarteamento, Figura 31 e Figura 32.

Figura 31 - Coleta de resíduos do despejo de resíduos do compactador



Fonte: O autor (2022).

Figura 32 - Transporte dos resíduos até a área destinada para gravimetria.



Fonte: O autor (2022).

Após o transporte a amostra era colocada em uma lona onde se realizava o rompimento dos sacos plásticos, Figura 33.

Figura 33 - Rompimento dos sacos plásticos.



Fonte: O autor (2022).

Feito o rompimento dos sacos era realizada a homogeneização manual da amostra com auxílio de pá e enxada, Figura 34.

Figura 34 - Homogeneização dos resíduos



Fonte: O autor (2022).

Com a amostra homogeneizada foi realizado o quartejamento, em que a amostra é separada em 4 partes iguais, Figura 35. Em seguida eram desprezadas duas das quatro partes, vis-à-vis,

sobrando duas porções de cerca 100L cada. Depois, as duas partes eram misturadas novamente de forma manual e realizado um segundo quarteamento. As amostras eram divididas em quatro partes de aproximadamente 50L e duas partes, vis-à-vis, eram desprezadas. No fim, restavam duas porções de cerca de 50L, totalizando uma amostra representativa do caminhão compactador de aproximadamente 100L.

Figura 35 - Quarteamento dos resíduos



Fonte: O autor (2022).

De posse da amostra representativa, tinha início à etapa de separação dos principais componentes que constituíam a amostra, ao todo 12 componentes. Essa separação foi realizada manualmente, e pesada em balança digital (Figura 36).

Figura 36 - Mini balança digital utilizada na pesagem



Fonte: O autor (2022).

A lista dos componentes está indicada na Tabela 18. Estes itens foram selecionados por serem os que mais estão presentes na composição dos RSU de uma região e são os que mais são encontrados na literatura de triagem de resíduos por autores tais como Cunha (2005), Jucá (2002b) e Tavares (2008).

Para cada município foi calculado o percentual dos componentes da amostra, para período seco e chuvoso, por meio da Equação 4.

$$CG(\%) = \frac{P_c}{P_t} \times 100 \quad (4)$$

Onde,

CG: composição gravimétrica (%);

P_c: Peso de cada componente;

P_t: Peso total do resíduo.

Tabela 18 - Componentes dos RSU e suas características

ORDEM	COMPONENTE	DESCRIÇÃO
1	Plástico flexível	Materiais fabricados a partir de resinas (polímeros) sintéticas derivadas de petróleo, pertencentes à categoria dos termoplásticos. Utilizados em diversos seguimentos tais como comércio, indústrias etc.
2	Plástico rígido	Materiais fabricados a partir de resinas (polímeros) sintéticas derivadas de petróleo, pertencentes à categoria dos termofixos. Utilizados em diversos seguimentos tais como comércio, indústrias etc.
3	Papel/Papelão	Material obtido através da celulose com grande conjunto de aplicações tais como: jornais, revistas, caixas, aparas de papel etc. Material obtido pelo emprego do papel, utilizado em caixas e recipientes.
4	Trapos (têxteis)	Material obtido do uso de lã, algodão, seda etc. utilizados em toalhas, roupas panos e fios.
5	Couros	Materiais obtidos dos diversos tipos de couro animal ou sintético, empregados em calçados, bolsas, malas etc.
6	Borracha	A borracha natural é o produto primário do cozimento do látex da seringueira. Hoje, a borracha sintética é concorrente do elastômero natural em algumas aplicações e complementar em outras, é produzida a partir de derivados de petróleo. Empregada em pneus, sapatos, bolsas entre outras aplicações.
7	Madeira	Materiais obtidos através da extração/corte de madeiras usualmente empregados em móveis.
8	Metais	Materiais de elevada durabilidade, resistência mecânica e fácil conformação, são obtidos através de processo industrial. Classificados em 2 grupos: Ferrosos: ferro e aço (menor valor), 20% da produção nacional é a partir de recicláveis; Não ferrosos: alumínio, latão e bronze.
9	Vidro	O vidro é obtido pela fusão de areia, barrilha, calcário e feldspato. É empregado na fabricação de recipientes e na construção civil em esquadrias, entre outras aplicações.
10	Matéria Orgânica	É a parte facilmente degradável sendo formada basicamente de restos de alimentos, folhas de vegetais e outros materiais orgânicos. O papel higiênico também foi considerado um elemento deste componente, pelo fato de ser um material contaminado com matéria orgânica de fácil biodegradabilidade.
11	Resíduos Sanitários	Resíduos originados nas atividades de higiene pessoal (Papel higiênico, absorvente, fralda descartável e preservativos).
12	Terra e Similares	São resíduos formados por solos (areia, argila) e pedregulho.

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2016.

Depois foi estimada a composição gravimétrica de cada região (1, 2, 3) por meio de média ponderada, tendo como referência a população de coleta de cada município de cada região. Por fim foi estimada a composição gravimétrica geral, também por média ponderada, tendo como referência a população de coleta de cada região e do município de Arapiraca.

4.4.3 Caracterização físico-química da fração orgânica

Como a fração orgânica foi utilizada nos ensaios de Produção Bioquímica de Metano (PBM), foi feita a sua caracterização físico-química. Foi então, utilizada parte das frações orgânicas separadas e coletadas na fase de composição gravimétrica, colocados em sacos hermeticamente fechados, acondicionados em caixas de isopor e encaminhados ao LSA/CTEC/UFAL.

No laboratório, cerca de 1kg de material foi utilizado para determinação do teor de umidade inicial das amostras e os outros 2 kg foram submetidos a corte e processamento para redução do tamanho das partículas e aumento da superfície específica para posterior utilização nos ensaios de determinação do teor de umidade, sólidos voláteis, pH e condutividade elétrica, DBO e DQO, e ainda para uso nos ensaios de Produção Bioquímica de Metano (BMP).

4.4.3.1 Teor de Umidade

O teor de umidade é um dos mais importantes parâmetros dos resíduos, uma vez que afeta diretamente os parâmetros mecânicos, químicos e hidrológicos dos resíduos (NOUSHEEN ARIF, 2010). O teor de umidade pode ser definido pela massa úmida (massa total de sólidos e líquidos) ou em função da massa seca (massa seca de sólidos).

Neste estudo a massa seca foi calculada baseado na NBR 6457 (ABNT, 1986), no qual se mantém uma amostra de resíduo, com massa conhecida (M úmida), em estufa a temperatura constante de 75°C até atingir uma massa final (M final) constante. Assim, o cálculo do teor de umidade é realizado utilizando-se a Equação 5.

$$\%W_w = \frac{(M_{úmida} - M_{final})}{M_{úmida}} \times 100 \quad (5)$$

4.4.3.2 Preparação das amostras

Em cada etapa foi utilizado uma amostra de 2,0kg de resíduos orgânicos que foram misturados e cortados. Em seguida, uma amostra de 500g de resíduos foi transferida para liquidificador de alta rotação industrial, 2L METVISA modelo LAR2220CC5, e água destilada foi adicionada até atingir um conteúdo final de 20% do volume de resíduo. A Figura 37 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e a Figura 38 apresentam o esquema geral e preparação da amostra para ensaio BMP.

Figura 37 - Esquema geral das etapas das amostras utilizadas nos ensaios



Figura 38: Preparação da amostra (a), Trituração em liquidificador industrial (b).



(a)



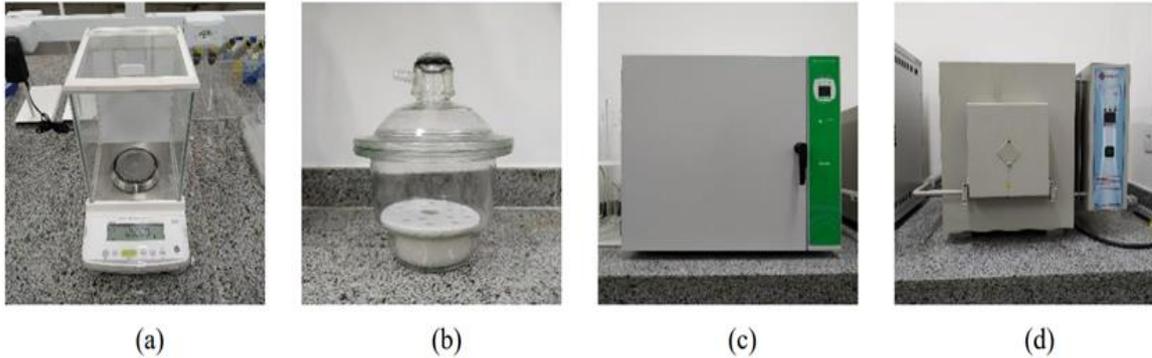
(b)

Fonte: O autor (2022).

4.4.3.3 Teor de Sólidos Voláteis

A série de sólidos foi determinada pelo método gravimétrico de acordo com APHA, AWWA e WEF (2012). Os equipamentos utilizados durante a análise foram: balança analítica Shimadzu® modelo ATX224, dessecador, Estufa Ethik Technology® modelo 400-2ND 200°C, Forno mufla Quimis® modelo Q318m24, estão apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Equipamentos para análise de sólidos voláteis: Balança analítica (a), dessecador (b), estufa (c) e forno mufla (d)



Fonte: O autor (2022).

Protocolo para determinação da série de sólidos

- Calcinar a cápsula vazia na mufla ($500 \pm 50^\circ\text{C}$) durante 1 h;
- Resfriar a cápsula em dessecador até atingir temperatura ambiente;
- Determinar o peso da cápsula vazia (P_0);
- Transferir um determinado volume de amostra para a cápsula;
- Acondicionar a cápsula com a amostra em estufa graduada a 105°C por um período de 24 h;
- Resfriar a cápsula com a amostra seca em dessecador até atingir temperatura ambiente;
- Determinar o peso da cápsula com a amostra seca (P_1);
- Calcinar a cápsula com a amostra seca na mufla ($500 \pm 50^\circ\text{C}$) durante 2 h;
- Resfriar a cápsula com a amostra calcinada em dessecador até atingir temperatura ambiente;
- Determinar o peso da cápsula com a amostra calcinada (P_2);
- Calcular a concentração (mg/L) de sólidos de acordo com as Equação 6, 7 e 8.

$$\text{Sólidos Totais (ST)} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(P_1 - P_0) \cdot 10^6}{V_{\text{Amostra}}} \quad (6)$$

$$\text{Sólidos Totais Voláteis (STV)} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(P_1 - P_2) \cdot 10^6}{V_{\text{Amostra}}} \quad (7)$$

$$\text{Sólidos Totais Fixos (STF)} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 10^6}{V_{\text{Amostra}}} \quad (8)$$

Em que:

P_0 – peso da cápsula, g;

P_1 – peso da cápsula mais amostra após secagem em estufa a 105°C , g;

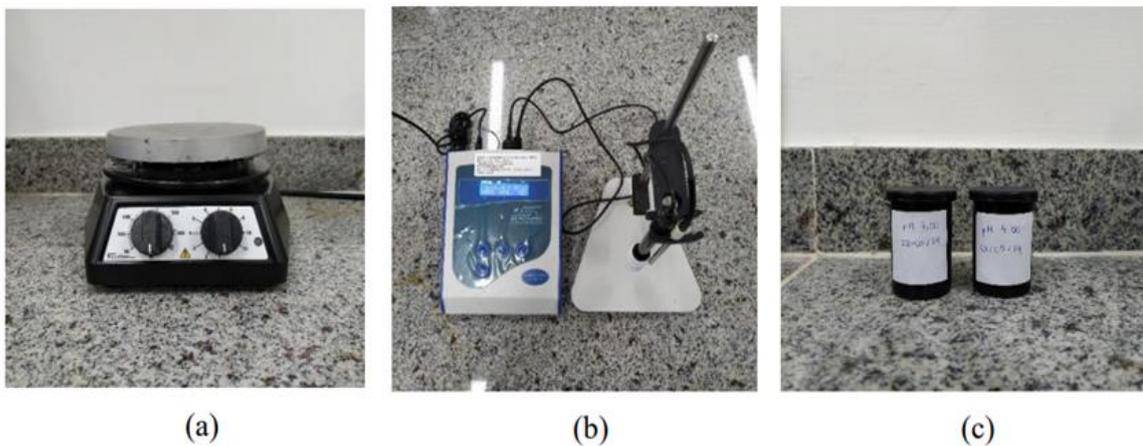
P_2 – Peso da cápsula mais amostra após calcinação na mufla a 550°C, g;

V_{Amostra} – volume da amostra, mL.

4.4.3.4 Potencial Hidrogeniônico - pH

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado pelo método potenciométrico de acordo com APHA, AWWA e WEF (2012). Os equipamentos utilizados durante a análise foram: agitador magnético com aquecimento Fisatom® modelo 752^a e Medidor de pH MS TECNOPON® modelo mPA210, estão apresentados na Figura 40.

Figura 40 - Equipamento para determinação do pH: Agitador magnético (a), medidor de pH (b) e soluções padrões de pH iguais a 7,0 e 4,0 (c)



Fonte: Do autor.

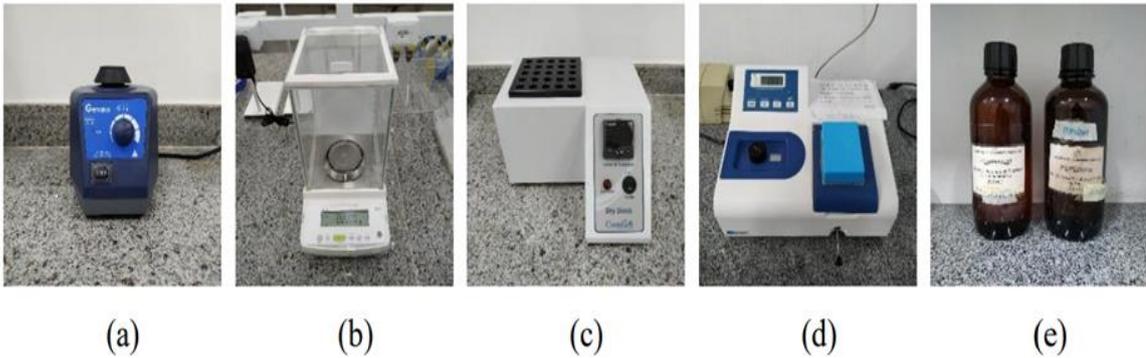
Protocolo para determinação do pH:

- Ligar o medidor de pH e esperar, por aproximadamente, 30 minutos sua estabilização;
- Calibrar o equipamento com as soluções padrões de pH iguais 7,0 e 4,0;
- Após o término da calibração, efetuar a leitura da amostra até que o mostrador digital não apresente mais variações e então anotar o valor do pH da amostra.

4.4.3.5 Demanda química de Oxigênio – DQO

A demanda química de oxigênio (DQO) foi determinada pelo método espectrométrico de acordo com APHA, AWWA e WEF (2012). Os equipamentos utilizados durante a análise foram: Agitador de tubos tipo Vortex Gehaka® modelo AV-2; Balança analítica Shimadzu® modelo ATX224; Digestor CienlaB® modelo CE-350/30 e dessecador. Estão apresentados na Figura 41.

Figura 41 - Agitador vortex (a), balança analítica (b), digestor (c), espectrofotômetro (d) e soluções de digestão (dicromato de potássio e sulfato de mercúrio) e de ácido sulfúrico e sulfato de prata (e)



Fonte: Do autor.

Protocolo para determinação da DQO:

- Realizar a curva analítica de Absorbância (nm) vs. DQO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) em um processador gráfico para obtenção da equação de correlação e avaliação de representatividade e confiabilidade do método;
- Após realizar a curva de calibração, adicionar 1,5 mL da solução de digestão (dicromato de potássio e sulfato de mercúrio) ao tubo de ensaio;
- Adicionar 3,5 mL da solução de ácido sulfúrico e sulfato de prata;
- Adicionar 2,0 mL da amostra, pura ou diluída;
- Preparar o branco com 2,0 mL de água destilada;
- Fechar perfeitamente os tubos com a tampa apropriada e agitar o conteúdo;
- Digerir a amostra por 120 min a 150°C , com o auxílio de um digestor;
- Após o período de digestão, resfriar as amostras em local escuro para posterior leitura no espectrofotômetro;
- Ligar o espectro e ajustar seu comprimento de onda para 620 nm. Posteriormente, esperar, por aproximadamente, 20 minutos sua estabilização;
- Efetuar a leitura da amostra.

4.4.3.6 Demanda bioquímica de oxigênio - DBO

A determinação da DBO será baseada pelo modelo APHA (1999), em que consiste em medidas da concentração de oxigênio dissolvido nas amostras, diluídas ou não, antes e após o período de incubação de 5 dias a 20°C . Durante esse período ocorrerá redução da concentração de OD na água, consumido por microrganismos aeróbios nas reações bioquímicas de decomposição de compostos orgânicos biodegradáveis.

Os parâmetros DBO_5 e DQO foram determinados para a fração orgânica bruta e inoculada.

4.5 Ensaio de Produção Bioquímica

Os ensaios de Produção Bioquímica de Metano (PBM) foram realizados para estimar experimentalmente o potencial de geração de metano dos resíduos orgânicos do aterro do CONAGRESTE.

Os ensaios de BMP foram realizados no Laboratório de Controle Ambiental - LCA/CTEC/UFAL com amostras da fração orgânica, após o quarteamento, coletadas durante a fase de caracterização do resíduo no mês de Julho/2019.

No experimento foram utilizados 7 (sete) reatores, 3 reatores apenas com o substrato preparado sem a presença de inóculo, 1 reator somente com lodo de inóculo e 3 reatores com substrato preparado mais lodo de inóculo. A Tabela 19 apresenta a disposição do experimento.

Tabela 19 - Disposição experimental.

Data de Início	Reator	Inóculo
10/01/2020	1	Substrato sem Inóculo
	2	
	3	
	4	Somente lodo de Inóculo
	5	Substrato com Inóculo
	6	
	7	

Fonte: Do autor.

O ensaio experimental foi conduzido em triplicata, em reatores de fluxo hidráulico descontínuo (batelada), para cada amostra de resíduo, com duração de 95 dias de monitoramento. Como reatores, foram utilizados frascos de vidro Duran® de 1L.

Nos reatores 1, 2 e 3 o volume reacional foi de 300 mL substrato preparado, no reator 4 foi adicionado 100 ml de lodo de inóculo resultando em volume reacional de 100 mL, e nos reatores 5, 6 e 7 foram adicionados 300 ml substrato e 100 ml de lodo de inóculo, somando um volume reacional de 400mL.

Os reatores, sem a presença de inóculo (1, 2 e 3), foram utilizados apenas por uma questão de comparação da potencialidade de geração de gás metano com o ensaio com a presença de inóculo e verificar o quanto o seu uso pode potencializar a geração de CH₄, e o reator 4 foi utilizado como “branco”.

4.5.1 Inóculo

O inóculo utilizado nos ensaios foi o lodo proveniente de um reator UASB, coletado em Dez/2019 para a utilização na etapa do experimento. Foi coletado em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de um condomínio residencial, localizado no bairro Tabuleiro do Martins, em Maceió, Alagoas. Não foi realizado nenhum pré-tratamento no inóculo.

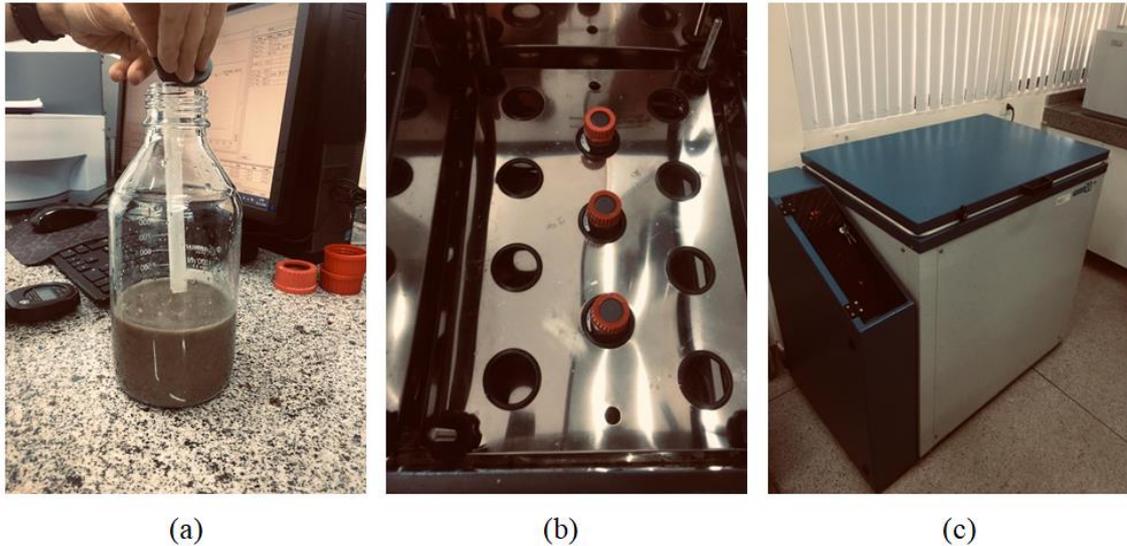
4.5.2 Circulação de N₂, incubação e monitoramento dos frascos

Para garantir a anaerobiose, o headspace dos reatores foi borbulhado com nitrogênio (N₂) por um período de 3 minutos para substituir o ar atmosférico. O volume do headspace de cada reator foi de:

- Reatores 1, 2 e 3: 700 mL
- Reator 4: 900 mL
- Reatores 5, 6 e 7: 600 mL

Para impossibilitar o vazamento de gases produzidos, os reatores foram hermeticamente fechados com rolha de borracha de butila e tampa plástica (Figura 42.a). Os reatores foram mantidos sob uma temperatura de $35\pm 1^\circ\text{C}$ e rotação de 120 rpm mantidas por uma câmara incubadora refrigerada com agitação orbital (shaker) MARCONI modelo MA830. A Figura 42, ilustra algumas etapas dos ensaios de BMP.

Figura 42 - Headspace dos reatores borbulhado por Argônio (a); Frascos incubados na estufa(b); Câmara incubadora (c)



Fonte: Do autor.

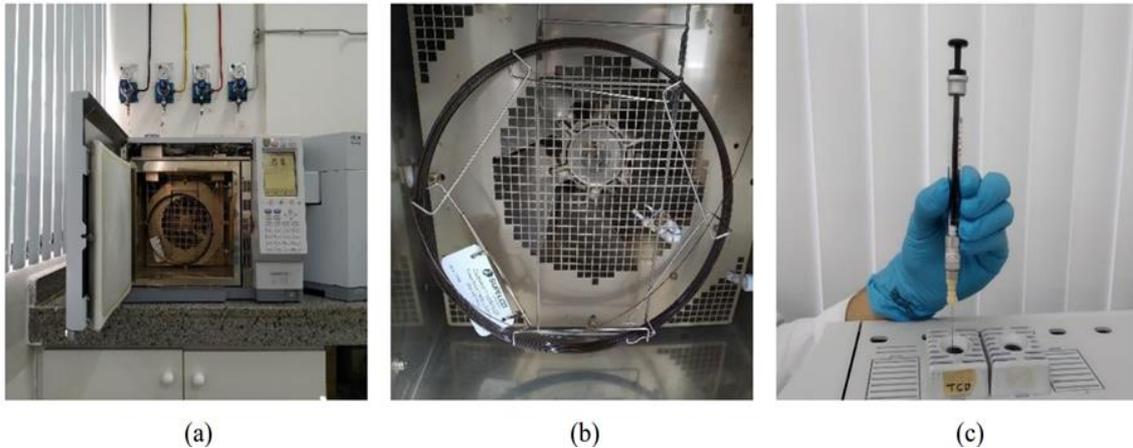
O acompanhamento do gás metano foi realizado, inicialmente, 3 vezes por semana até que se obteve uma alta produção e passou a ser monitorado 5 vezes por semana. Os gases foram mensurados 24 horas após a montagem e partida dos reatores.

4.5.3 Cromatografia gasosa

O gás metano foi determinado e mensurado através de cromatografia gasosa, segundo metodologia proposta por Maintinguer et al.2008.

O cromatógrafo gasoso Shimadzu® modelo GC-2010 (Figura 43a) equipado com um detector de condutividade térmica (TCD) e uma coluna Carboxen™ 1010 PLOT com capilar de sílica fundida (30,00m x 0,53mm x 0,00µm), tendo o Argônio (Ar) como gás de arraste (Figura 43b). As temperaturas do injetor, detector e coluna foram 200, 230 e 35°C, respectivamente. O tempo total de análise foi de 5 minutos, sendo o metano detectado em $3,6 \pm 0,1$ min, aplicando uma rampa de temperatura de 35°C (5'). Para a análise, 1 mL do gás contido no headspace foi injetado manualmente no cromatógrafo gasoso com o auxílio de uma seringa GASTIGHT® com trava da marca HAMILTON®, Figura 43. A calibração da cromatografia gasosa foi realizada usando 99,999% (v/v) de H₂.

Figura 43 - Cromatógrafo gasoso (a), coluna Carboxen (b) e seringa GASTIGHT® (c)



Fonte: Do autor.

As condições cromatográficas foram:

- Gás de arraste: Argônio sob fluxo de $21,9 \text{ cm. s}^{-1}$;
- Temperaturas do forno: $30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Temperatura da coluna: $200 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Temperatura do detector: $230 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.5.4 Produção de Metano (CH_4)

Para o cálculo da determinação da produção de metano foi aplicado o mesmo método utilizado por Lapa (2006), Oliveira (1997) e Steil (2007), assim descrito:

- a) As áreas do metano fornecidas pelo cromatógrafo foram convertidas em Mol de CH_4 ($\text{mol}.\text{CH}_4$) utilizando a equação da reta de metano padronizada;
- b) Foram acumuladas as concentrações de metano da seguinte forma:
 - No tempo 0, a concentração de metano era aquela obtida no headspace do frasco nesse tempo;
 - No tempo 1, a concentração de metano era aquela obtida no headspace do frasco nesse tempo, mais a concentração de metano obtida no tempo anterior (zero);
 - No tempo 2, a concentração de metano era aquela obtida no headspace do frasco nesse tempo; mais a concentração de metano obtida no tempo 0, e no tempo 1. E assim sucessivamente.

- c) Os valores de metano obtidos na amostra de 1 mL retirados dos reatores foram convertidos para o headspace de cada frasco através da Equação 9:

$$[CH_4]_{no\ headspace\ (mol)} = \frac{[CH_4]_{na\ amostra} \times volume\ do\ headspace}{Volume\ de\ amostragem} \quad (9)$$

Em que,

$[CH_4]_{no\ headspace\ (mol)}$ = Mol de metano no headspace (n);

$[CH_4]_{na\ amostra}$ = Mol de metano na amostra injetada no cromatógrafo (mol.CH₄);

Volume do headspace = Volume total do headspace do reator (100, 600 ou 900mL);

Volume de amostragem = Volume sacado no reator e injetado no cromatógrafo (1mL);

- d) Os volumes acumulados de metano nos headspace em mol/L, foram convertidos em L_{CH₄}/L através da equação geral dos gases (Equação 10).

$$PV = nRT \quad (10)$$

Em que,

P = 696,7 mmHg;

V = Volume a ser convertido;

n = Número de mol do gás (CH₄.headspace);

R = 62,3 mmHg T = 237 + 26°C.

- e) Foi utilizado o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV) como composição da média das réplicas dos reatores.
- f) Para ajuste dos dados experimentais, obtidos através das médias de produção de metano CH₄ dos reatores em batelada, foi utilizado o Software Origin Pro 8. A máxima produção de metano foi estimada através do ponto de inflexão – ponto no qual ocorre a taxa máxima de variação da função – dos modelos de regressão não-linear ajustados aos dados observados.

Os dados experimentais da produção acumulada de metano, obtidos pelas médias dos reatores em triplicata, foram ajustados ao modelo de Gompertz modificado representado pela Equação 11.

$$H = P \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_m}{P} \cdot e \cdot (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (11)$$

Onde:

H - produção acumulada de metano (mL);

P - potencial de produção de metano (mL);

R_m - taxa de produção máxima de metano ($\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$);

λ - tempo da fase lag ou tempo mínimo para produzir metano (h);

t - tempo de incubação do reator (h)

e - número de Euler (2,71828).

As constantes cinéticas P, R_m e λ foram determinadas através de regressão não-linear com o uso do software Origin 2020.

O modelo de Gompertz modificado é o mais utilizado para descrever o progresso da produção cumulativa de metano em experimentos em batelada, relacionando-a com o crescimento e o metabolismo microbiano (GHASEMIAN et al., 2016; NETO, 2019).

4.5.5 Cálculo dos parâmetros k e L0 experimentais da fração orgânica

Para que seja possível estimar a produção de gás metano do processo de digestão anaeróbia é necessário determinar o potencial de geração de gás metano (L0) e a constante cinética de decaimento K, que representa a taxa de geração de gás metano de acordo com a decomposição de cada tipo de resíduo no aterro. O valor da constante K será determinada apenas para fins de análise laboratorial, não sendo recomendada para uso nos programas LandGEM e IPCC, pois na escala laboratorial o valor encontrado para essa constante não representaria a realidade de um aterro.

Para a determinação de L0 foi realizado a divisão da constante cinética do potencial de geração de gás metano, determinada pelo modelo de Gompertz modificado, pelo teor de sólidos voláteis presentes no reator.

A constante cinética k foi determinada conforme metodologia presente nos trabalhos de Firmo (2013), Wang et al. (2015) e Lima (2016), a partir da Equação 12.

$$y = a. (1 - e^{-kt}) \quad (12)$$

Em que,

y – Potencial de geração de metano ($\text{Nml CH}_4 / \text{gSV}$) ao longo do tempo (t);

- a - Potencial máximo de geração de metano (Nml CH₄ /gSV) durante o tempo de realização do ensaio;
- k – Constante cinética de decaimento (dias⁻¹), específica para as condições operacionais dos ensaios experimentais;
- t - Tempo de duração do ensaio, em dias.

Calculado o potencial de geração de metano pode-se determinar a constante k diretamente pela Equação 13.

$$K = - \frac{\ln\left(1-\frac{y}{a}\right)}{t} \quad (13)$$

4.6 Estudo da geração de gás metano por modelos matemáticos

Para o estudo da geração de gás metano foram utilizados dois modelos matemáticos, o modelo multicomponente do IPCC (2006) e o programa LandGEM (Landfill Gas Emissions Model), um programa desenvolvido pelo Control Technology Center da Environmental Protection Agency (EPA/2005). Segundo Firmo (2013), a diferença existente entre eles consiste de o modelo do IPCC (2006) considerar a constante cinética de degradação (k) e o potencial de geração de biogás (L₀) diferentes para cada tipo de material existente nos RSU, enquanto que o modelo do EPA (2005) considera valores médios para todo o resíduo em geral.

O estudo da geração de gás metano foi dividido em dois cenários:

- (a) Cenário 1: Uso de dados ‘defaults’ recomendados pelo modelo;
- (b) Cenário 2: Uso dos parâmetros obtidos experimentalmente em laboratório para a fração orgânica.

Para aplicação desses modelos, a projeção populacional e o cálculo da quantidade de RSU gerada pela área de estudo são fundamentais nas análises de produção de biogás e metano no aterro sanitário, pois durante a vida útil do aterro haverá crescimento na quantidade de resíduos depositados e conseqüentemente maior geração de gás metano. Esse cálculo foi realizado a partir da projeção da população estimada para cada ano de vida útil do aterro sanitário e pela coleta per capita de RSU.

4.6.1 Estudo da projeção populacional

A projeção populacional foi estimada, com base em dados dos Censos e contagem do IBGE dos anos de 1950, 1960, 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010 para cada município envolvido no consórcio, para um horizonte de 20 anos.

Aos dados foram aplicados os métodos matemáticos de crescimento linear, geométrico, exponencial e logarítmico (Tabela 20), com o auxílio da ferramenta Excel. Para verificar qual o método que apresentou o melhor ajuste, foi calculado o coeficiente de correlação (R^2), tendo sido adotada a equação de crescimento que apresentou coeficiente de correlação de Pearson mais próximo da unidade (melhor ajuste). A partir da curva de melhor ajuste foi feita a projeção da evolução populacional para o período de vida útil de cada CTR.

Tabela 20 - Equações matemáticas para estimativas de crescimento populacional

Ajuste	Equação
Linear	$Y = A.X + B$
Geométrico	$Y = A.X^B$
Exponencial	$Y = A.e^{BX}$
Logarítmico	$Y = A.\ln(X) + B$

Para o cálculo anual da produção diária de resíduos sólidos domiciliares (P_d) gerados nos municípios que compõem o CONAGRESTE, ao longo de 20 anos, considerou-se a taxa da geração per capita (g) e a população (P), segundo a Equação 14.

$$P_d = \frac{pop \cdot g \cdot R}{1000} \quad (1)$$

Em que,

P_d : produção diária média de resíduos (kg/dia)

P_{op} : população no determinado ano considerado

g : geração per capita de resíduo do aterro no determinado ano considerado (kg/hab.dia)

R : percentual de resíduos aterrados (%).

4.6.2 Estudo da geração *per capita* de resíduos

Para a determinação da geração per capita (g) de resíduos de cada município, inicialmente foi feito o cálculo do valor per capita de resíduos coletados, com dados quantitativos do recebimento mensal dos RSU referente aos anos de 2020 e 2021, disponibilizados pela CTR do CONAGRESTE, e os dados de população de cada município referentes a esses mesmos anos,

anteriormente estimados (item 5.6.1). As informações sobre os dados disponibilizados pelo aterro encontram-se no Apêndice C

Depois, realizou-se um levantamento de dados da série histórica do Sistema Nacional sobre Saneamento Básico (SNIS) sobre geração per capita de Resíduos Sólidos nos últimos 10 anos (2009 -2019) e juntou-se com os dados levantados no aterro para os anos de 2020 e 2021 para fazer uma análise de regressão para estimar o crescimento dos valores *per capita* de geração de RSU de cada município ao longo do horizonte de 20 anos. No entanto, os dados foram inconsistentes, apresentando coeficiente de correlação menor que 0.1, o que impossibilitou a análise por regressão.

Diante disso, os dados de geração per capita levantados para 2020 e 2021 foram comparados com os dados constantes no levantamento realizado por Jucá (2002), apresentado na

Tabela 21, e verificou-se que em sua grande maioria (89%) ainda se encontravam dentro da estimativa proposta para cada faixa populacional.

Tabela 21 - Taxa de Geração per Capita de resíduos sólidos urbanos por faixa de população

Faixa Populacional	Estimativa de Geração Percapita (kg/hab/dia)								
	Domiciliar			Urbano			Total		
	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média
Menor que 10.000 hab.	0,75	0,4	0,57	0,63	0,04	0,3	1,16	0,54	0,87
Entre 10.000 e 20.000 hab.	0,87	0,43	0,6	0,91	0,01	0,35	1,38	0,60	0,88
Entre 20.000 e 50.000 hab.	0,88	0,47	0,61	0,61	0,04	0,33	1,35	0,55	0,94
Maior que 50.000 hab.	0,79	0,62	0,6	0,71	0,29	0,79	1,34	1,07	1,34

Fonte: JUCÁ, 2002.

Assim, para a projeção da evolução do valor de geração per capita de resíduos sólidos para cada município, no horizonte de 20 anos estudado, foi adotada os valores levantados por Jucá (2002), tomando como referência, sempre que possível o per capita inicial levantado para 2021 ou o valor mínimo apresentado na Tabela 21, e como valor final do plano, o valor máximo levantado por Jucá (2002), com incremento anual calculado de acordo com a Equação 15.

$$TPC_i = \frac{PC_{\max i} - PC_{\min i}}{H} \quad (15)$$

Onde,

TPC=Taxa de crescimento de geração *per capita* de RSU do município com população *i*;

PCmaxi = geração per capita de RSU máxima do município com população *i*.

PCmini = geração per capita de RSU mínima do município com população *i*.

H = Horizonte médio restante até final de vida útil do aterro – 20 anos.

O valor per capita global anual foi calculado a partir da média ponderada dos valores per capita e a população de cada município envolvido, conforme Equação 16.

$$PCG = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (16)$$

Onde:

PCG = geração per capita anual do aterro no ano *i*;

x_i = valor per capita do município;

P_i = Projeção populacional no ano *i* do município.

4.6.3 Aplicação do Modelo IPCC (2006)

Para o “Cenário 1” foram considerados os valores defaults fornecidos pelo modelo. De acordo com IPCC (2006) os valores padrões da constante de degradação ‘*k*’, para todos os resíduos em função das condições climáticas da região estão expressos na Tabela 22.

Tabela 22 - Valor padrão da constante de degradação (*k_i*) nos componentes dos RSU

Tipos de resíduos	<i>k_i</i>
Resíduos de comida	0,085
Resíduos de jardins	0,065
Papel	0,045
Madeira	0,025
Têxtil	0,045
Sanitários	0,065

Fonte: IPCC, 2006.

Segundo IPCC (2006), uma maneira de se calcular o potencial de geração de metano (L_0), utilizada na presente pesquisa, é através da Equação 17.

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (17)$$

Onde:

L_0 : potencial de geração de metano do resíduo (Gg de CH_4 /Gg de RSU);

FCM : fator de correção de metano referente ao gerenciamento do local de disposição;

COD : carbono orgânico degradável (Gg de C/Gg de RSU);

COD_f : fração de COD dissociada (%);

F : fração em volume de metano (%);

$\frac{16}{12}$: fator de conversão de carbono em metano (Gg de CH_4 /Gg de C).

Segundo IPCC (2006), o valor do fator de correção de metano (FCM) para disposição de resíduos sólidos de forma adequada e bem gerenciada, que é a situação do aterro de análise, é igual a 1.

De acordo com CETESB (2006), a fração de carbono orgânico degradável dissociada pode ser determinada através da Equação 18 a seguir.

$$COD_f = 0,014T + 0,28 \quad (18)$$

Em que,

T: Temperatura na zona anaeróbia dos resíduos [$^{\circ}C$] = $37^{\circ}C$ $\rightarrow COD_f = 0,798$.

O valor da fração em volume de metano (F) foi considerado igual a 0,5, uma vez que foi considerado que o biogás gerado em um aterro sanitário pelos resíduos sólidos possui um percentual de cerca 50% de metano.

O carbono orgânico degradável (COD) é o carbono orgânico dos resíduos que é acessível à decomposição bioquímica. O COD é estimado com base na composição de resíduos e pode ser calculado a partir de uma média ponderada do teor de carbono de vários componentes degradáveis (tipos de resíduos / materiais) do fluxo de resíduos (IPCC, 2006). Para o cálculo do COD foi utilizada a Equação 19.

$$COD = \sum(COD_i \times W_i) \quad (19)$$

Em que:

COD : Fração de carbono orgânico degradável no lixo

COD_i : Fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo i

W_i : Fração do tipo de resíduo i por categoria do resíduo

De acordo com os valores default do modelo, o valor de COD_i adotado para cada tipo de resíduo são expressos na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores defaults da fração de carbono orgânico degradável (COD_i)

Tipos de resíduos	COD_i
Resíduos de comida	0,15
Resíduos de jardins	0,20
Papel	0,40
Madeira	0,43
Têxtil	0,24
Sanitários	0,24

Fonte: IPCC, 2006.

Utilizou-se a Equação 20 para estimar a massa de metano obtida no processo de decomposição de cada material dos resíduos.

$$MCH_{4i} = MCO_{Di} \cdot \frac{16}{12} \cdot F \quad (20)$$

Em que,

MCH_{4i} - é a massa de metano produzida em um tempo infinito a partir da decomposição da massa de carbono orgânico disponível para degradação (MCO_{Di});

16/12 - é a relação estequiométrica entre o metano e o carbono;

F - é a fração mássica de metano existente no biogás.

A vazão de gás metano pelo modelo é fornecida em toneladas e a partir da densidade do gás metano, $\rho = \frac{0,717kg}{m^3}$, estima-se a vazão volumétrica em m³. O volume total de metano gerado será obtido pelo somatório do volume de metano de cada componente dos resíduos, conforme Equação 21.

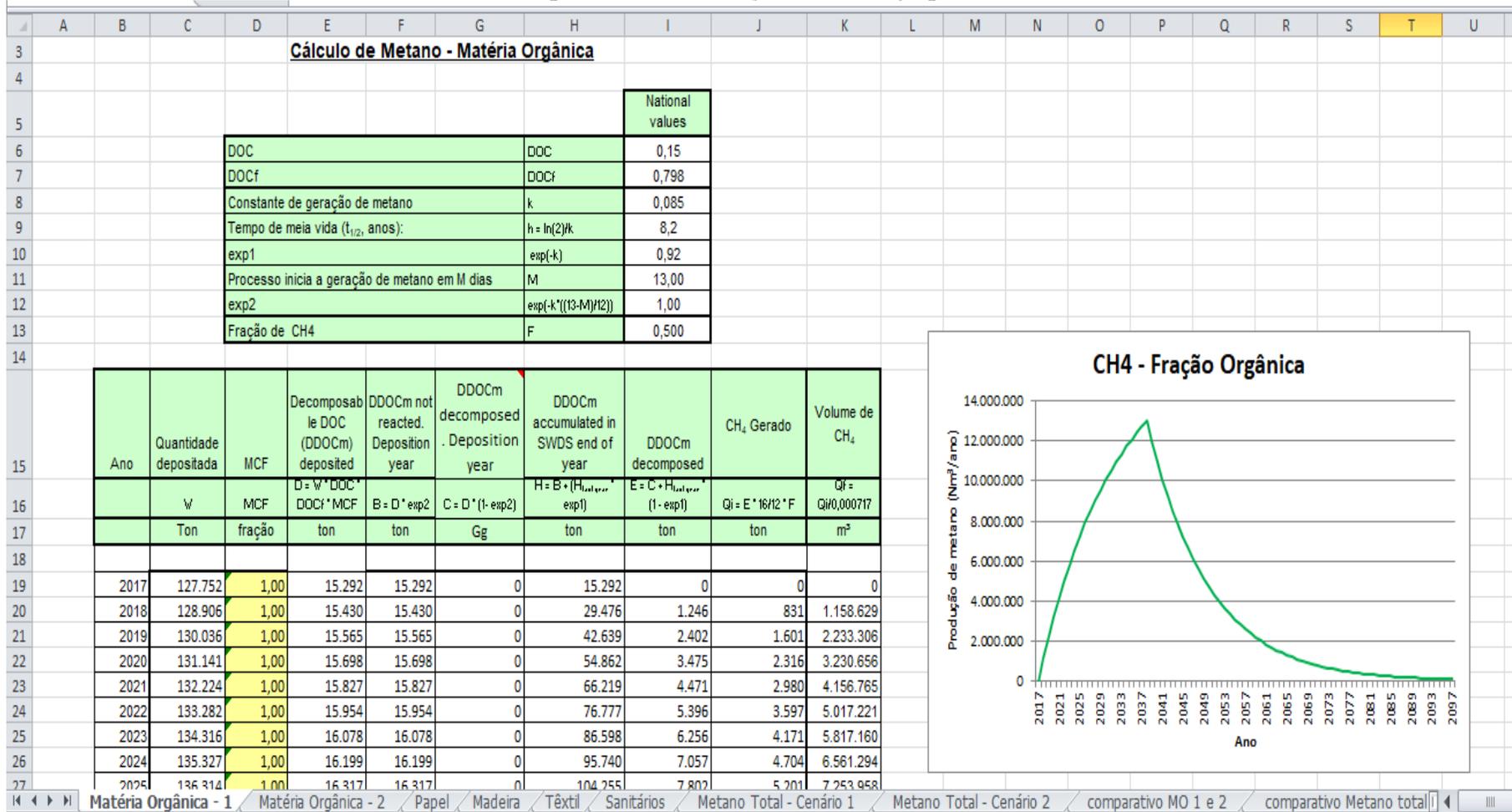
$$QCH_{4TOTAL} = \sum QCH_{4i} \quad (21)$$

Para o “Cenário 2” foram considerados os valores do potencial de geração de gás metano e COD da fração orgânica determinados nas análises de laboratório, já os valores dos demais componentes dos resíduos permanecerão sendo os valores padrões da ferramenta para as condições climáticas local.

O COD da matéria orgânica foi determinado pela Equação 16, em que o potencial de geração de metano (L_0) será o que foi determinado por análise laboratorial. Os valores de FCM, COD_f e F permanecerão os mesmos adotados para o cenário 1.

Para a utilização do modelo IPCC (2006) no aterro, foi utilizada a ferramenta disponível da Microsoft Office Excel. A Figura 44 mostra o modelo da tela de inserção de dados do programa, que tem uma interface com a Microsoft Excel, para o cálculo da emissão de gás metano da fração orgânica.

Figura 44 - Tela de inserção de dados do programa IPCC



4.6.4 Aplicação do Modelo EPA (2005)

O software fornece uma abordagem relativamente simples para estimar as emissões de gás de aterro. Os padrões do modelo são baseados em dados empíricos e dados do próprio aterro sanitário (ATABI, F. *et al.*, 2014).

O programa parte de uma equação de primeira ordem para fazer as estimativas das emissões dos gases para o ano desejado (Equação 22).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (22)$$

Onde:

Q_{CH_4} : produção anual de metano para determinado ano (m^3/t);

i: 1 - acréscimo por ano;

n: ano do cálculo (ano inicial de abertura do aterro);

j:0,1 - acréscimo por ano;

k: taxa de geração de metano (ano^{-1})

L_0 : potencial de geração de metano (m^3/Mg);

M_i : massa de resíduos recebidos no ano em cada seção (Mg);

t_{ij} : ano, em cada seção, de recebimento da massa de resíduos (tempo, com precisão de decimais).

Os dados experimentais de geração de metano foram considerados com uma composição volumétrica de 50% do volume do biogás, desconsiderando a variação desta composição ao longo do tempo.

Os parâmetros L_0 e K são os mais importantes, pois refletem variações de acordo com o local, clima e tipo de resíduos. O fator K varia de 0,003 a 0,21 (ano^{-1}). Nas condições brasileiras o fator K pode ser aplicado para variação de 0,05 até 0,15 e o fator L_0 no Brasil varia de 140 até 190 m^3/t (FIGUEIREDO, 2012).

Para a configuração do “Cenário 1” as variáveis k e L_0 adotadas foram os valores padrões programa, que para climas úmidos, com precipitações de, no mínimo, 635 mm anuais, recomenda um k de 0,05 ano^{-1} e L_0 de 170 $m^3.Mg^{-1}$ (USEPA, 2005).

A Figura 45 mostra a tela de inserção de dados do programa, que tem uma interface com a Microsoft Excel.

Figura 45 - Tela de inserção de dados do programa LandGEM.

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2017	272.219	299.441
2018	274.677	302.144
2019	277.084	304.793
2020	279.441	307.385
2021	281.747	309.921
2022	284.002	312.402
2023	286.206	314.827
2024	288.360	317.196
2025	290.463	319.509
2026	292.516	321.767
2027	294.519	323.970
2028	296.472	326.120
2029	298.376	328.214
2030	300.232	330.256
2031	302.040	332.244
2032	303.800	334.180

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Name or Identifier: Aterro Sanitário da CONAGRESTE

Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections

Landfill Open Year: 2017

Landfill Closure Year: 2037

Have Model Calculate Closure Year? Yes No

Waste Design Capacity: megagrams

Restore Default Model Parameters

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k (year^{-1}): 0.05

Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg): CAA Conventional - 170

NMOC Concentration (ppmv as hexane): CAA - 4,000

Methane Content (% by volume): CAA - 50% by volume

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1: Default pollutant parameters are currently being used by model.

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units: Mg/year

INTRO USER INPUTS POLLUTANTS INPUT REVIEW METHANE RESULTS GRAPHS INVENTORY REPORT

Na configuração do “Cenário 2” foi utilizado um novo valor de L0 a partir de dados provenientes dos ensaios de composição gravimétrica dos resíduos e do ensaio laboratorial da matéria orgânica determinados pelas equações do modelo IPCC (2006). O fator de correção de metano (FMC) foi considerado igual a 1; fator de correção de carbono dissociada (COD_f) igual a 0,798; o carbono orgânico degradável (COD) foi obtido com os dados gravimétricos dos resíduos e laboratorial.

4.7 Determinação da Potência e Energia Disponível

A estimativa da potência disponível, a partir do gás metano gerado no aterro, foi realizada em dois cenários:

- Cenário 1: Com valor de geração de CH₄ mais desfavorável da modelagem do IPCC;
- Cenário 2: Com valor da geração de CH₄ mais favorável da modelagem com o IPCC.

Em ambos os cenários foi considerado uma perda de metano pela camada de cobertura de 10%, ou seja, eficiência no sistema de captação do gás metano de 90%. A potência foi determinada pela Equação 23.

$$P_x = \frac{Qx.PC_{metano}.n}{31536000} . EC . \frac{1}{1000} \quad (23)$$

Em que,

P_x - Potencia disponível a cada ano (kW);

Qx - Vazão do metano coletado a cada ano (m³ de CH₄/ano);

PC_{metano} - poder calorífico do metano = 35,53.10⁶ J/m³ CH₄;

η - eficiência da tecnologia de conversão (%) = 30%;

31.536.000 – quantidade de segundos no ano (s/ano);

1/1000 – para transformação da unidade de J/s para kW.

Para o cálculo da energia disponível utilizou-se a Equação 24.

$$E = P . R_{end} . T \quad (24)$$

Em que,

E – energia disponível (kWh/dia);

P – Potência disponível (kW);

R_{end} – Rendimento do motor = 85% (adotado)

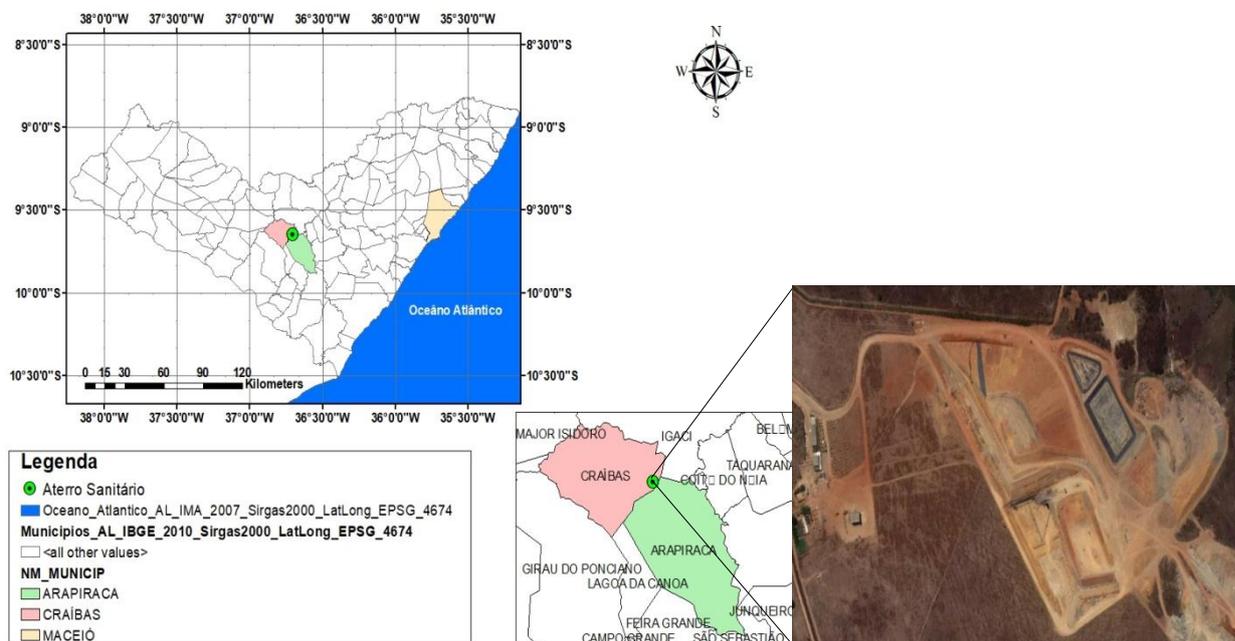
T – Tempo de operação do motor = 24 h/dia.

5 CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO

5.1 Localização do Aterro Sanitário

O aterro sanitário em estudo localiza-se no estado de Alagoas, na região do agreste, entre os municípios de Arapiraca e Craíbas, sob as coordenadas central de Latitude $9^{\circ}38'41''\text{S}$ e Longitude $36^{\circ}42'09''\text{W}$, cerca de 13 km do centro da principal cidade do agreste alagoano, Arapiraca, e 140 km da capital do estado, Maceió. O acesso principal se dá pela rodovia AL-115. A Figura 46 apresentam o mapa de localização e uma vista aérea do aterro sanitário.

Figura 46 - Localização do Aterro Sanitário do Agreste Alagoano

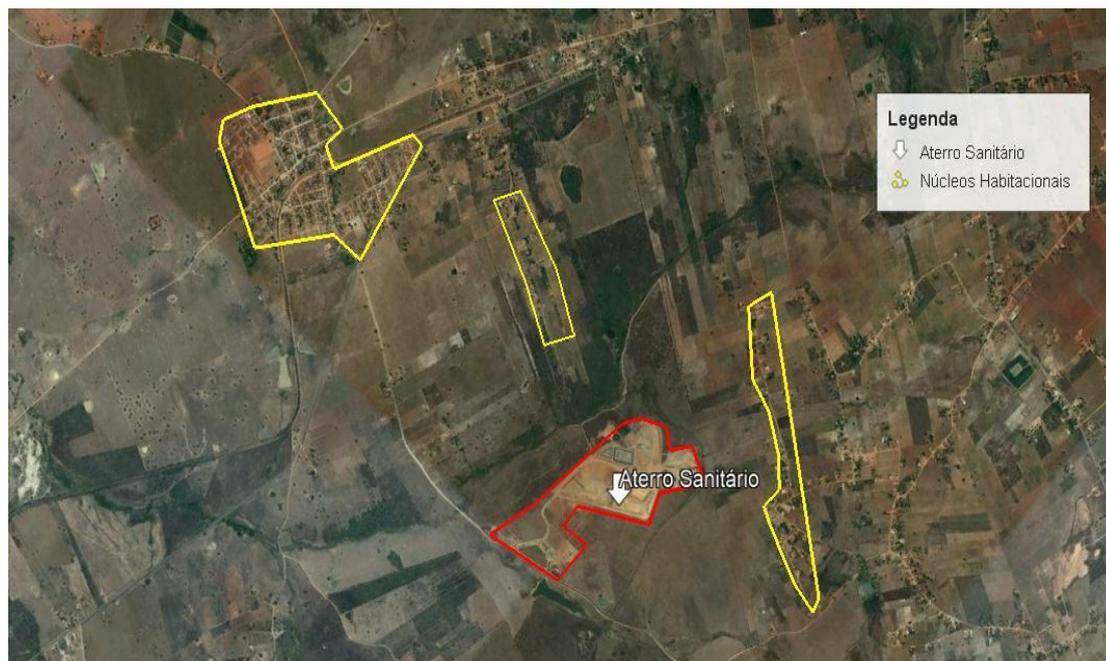


Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta ArcGis.

A presença de núcleos habitacionais em um raio menor que 1km é um sério agravante socioambiental deste local. Alguns desses núcleos estão com distâncias menores que 500m. A população do entorno constantemente reclama do odor emitido pelo aterro sanitário provenientes dos resíduos e dos gases gerados.

A Figura 47 mostra o aterro sanitário com marcações dos conjuntos de edificações no seu entorno, inclusive com distâncias que variam de 400m a 1km do aterro.

Figura 47: Localização do Aterro Sanitário do Agreste Alagoano e núcleos habitacionais.



Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta Google Earth Pro.

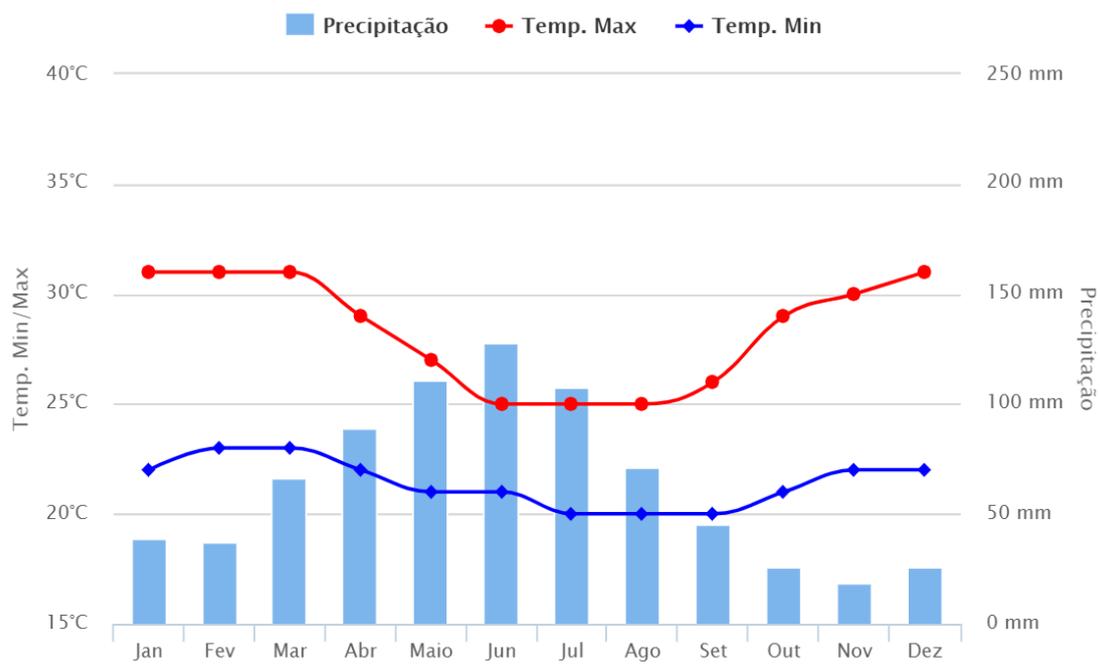
5.2 Condições Climáticas da Região

A área em estudo está inserida no agreste alagoano, em que as condições climáticas são semiáridas com clima do tipo BSh (segundo a classificação de Köppen), isto é, clima seco e quente com precipitação anual variando entre a 600 a 900 mm, apresentando um padrão de distribuição irregular ao longo do tempo.

A temperatura mínima média entre na região é de 20,33°C, com temperaturas mais baixas entre os meses de junho a outubro. Já a temperatura máxima média é de 28,2 °C, com temperaturas mais elevadas entre os meses de novembro a maio. A região possui uma precipitação anual de 882,2 mm e uma precipitação média anual de 73,5 mm. Os maiores índices pluviométricos concentram-se entre os meses de maio a julho.

A Figura 48 apresenta a série histórica de temperatura e precipitação da área em que o aterro sanitário está localizado.

Figura 48 - Precipitação acumulada mensal e temperaturas médias da área estudada

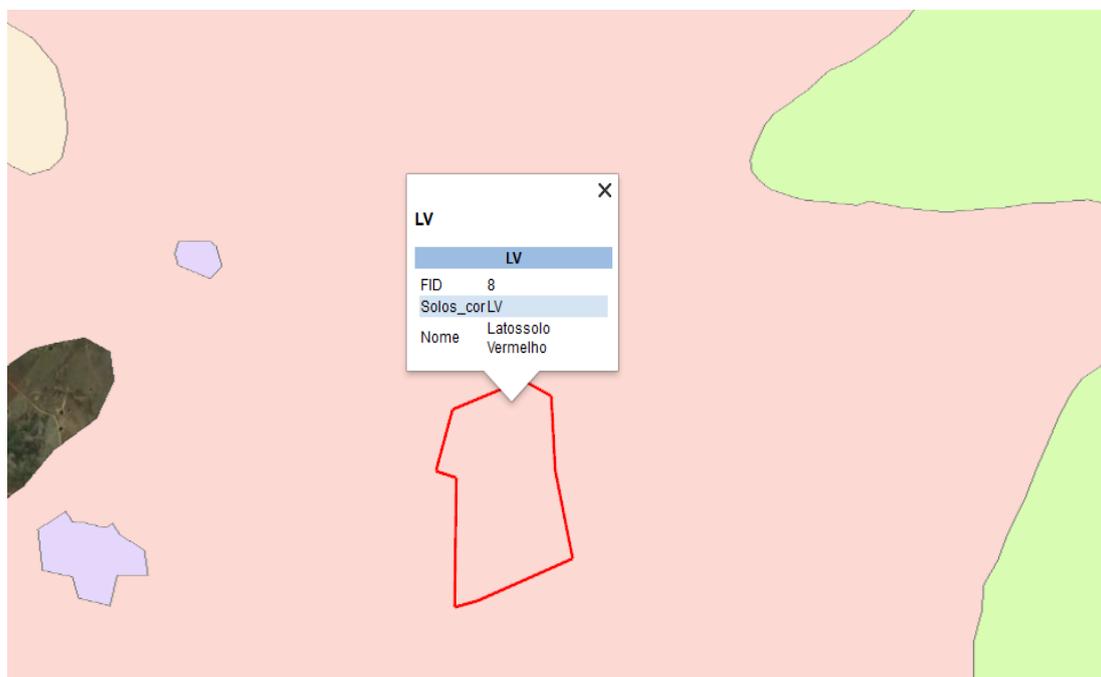


Fonte: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/5704/craibas-al.>

5.3 Solo da Região

O aterro está inserido na região do Latossolo Vermelho, conforme mostrado na Figura 49.

Figura 49 - Solo da área estudada.



Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta ArcGis.

Segundo a Embrapa (2018), os Latossolos são solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Os solos são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo. Variam de fortemente a bem drenados, de drenagem moderada ou até mesmo imperfeitamente drenada, o que é indicativo de formação em condições atuais ou pretéritas. São solos profundos, bem drenados típicos das regiões equatoriais e tropicais.

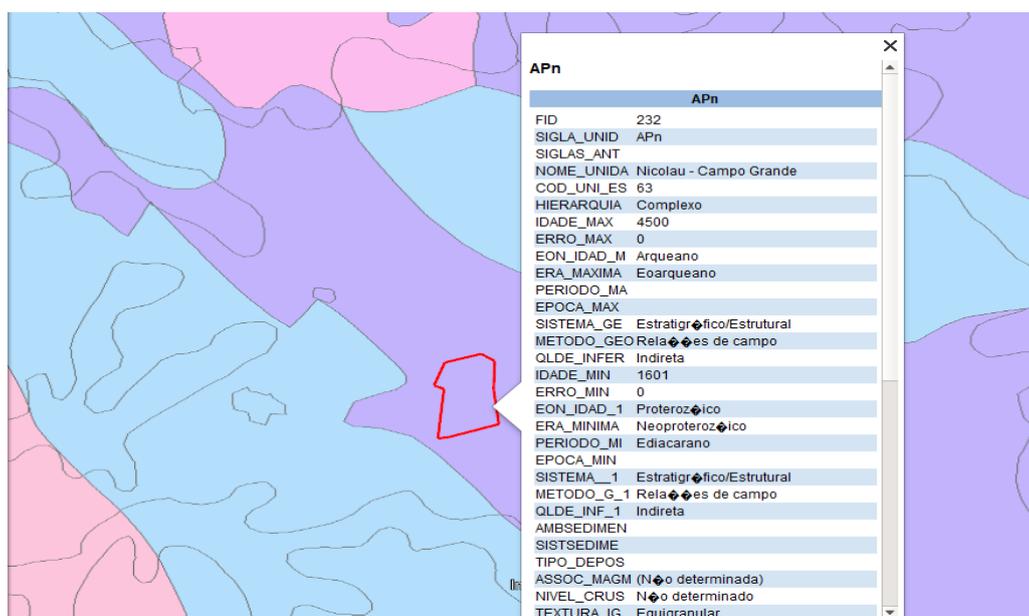
Os latossolos vermelhos são solos minerais com textura argilosa, muito argilosa ou média. Suas condições físicas aliadas ao relevo plano ou suavemente ondulado favorecem sua utilização para a agricultura. Os de textura média são mais pobres e podem ser degradados facilmente por compactação e erosão.

De acordo com Nunes (2004), esse é o principal tipo de solo utilizado como recobrimento em aterros sanitários, pois são solos formados a partir de material de origem muito diversa, o que lhes confere certa variabilidade nas características morfológicas, especialmente textura e consistência, além de influir nas propriedades químicas. São solos de boa drenagem interna, mesmo os de textura argilosa.

5.4 Geologia e Geomorfologia da Região

A geologia da área do aterro é caracterizada pelo Complexo Nicolau-Campo Grande, Figura 50.

Figura 50 - Geologia da área estudada

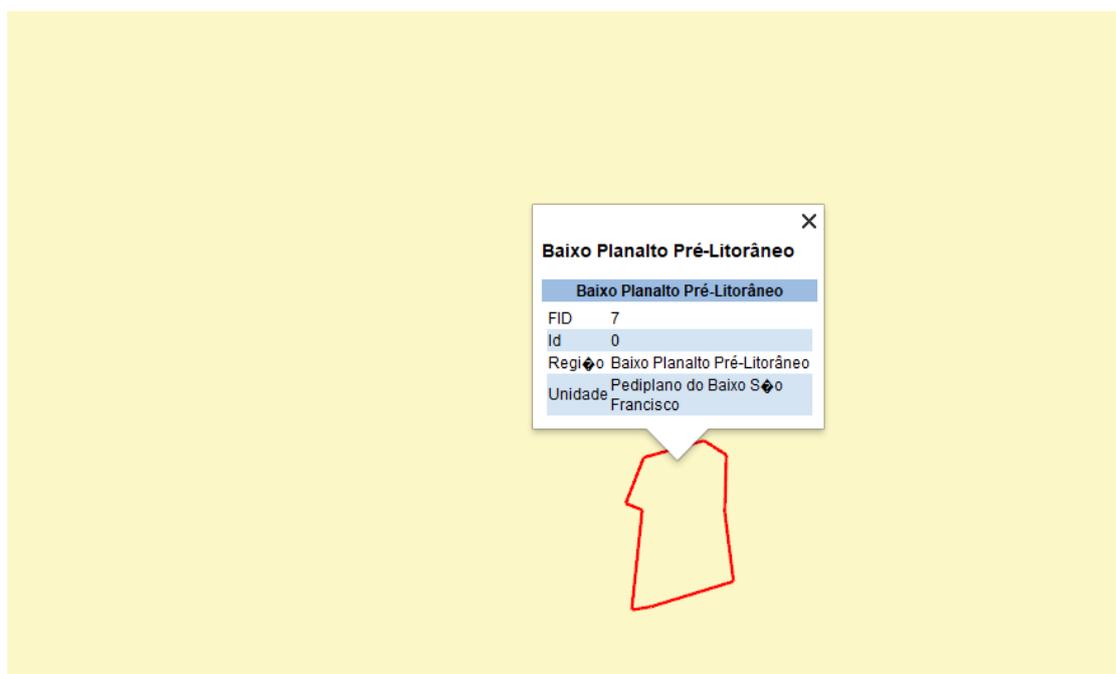


Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta ArcGis.

Segundo Lima (2018), o Complexo Nicolau-Campo Grande é uma sequência metavulcanossedimentar composta por hornblenda paragnaisse e biotita-clorita xistos associados a rochas vulcânicas ácidas, intermediárias e máficas que bordejam o núcleo Jirau do Ponciano. É constituído por rochas metapelíticas com estratificação rítmica interpretadas como turbiditos de natureza.

Quanto a geomorfologia da região do aterro, representada pela Figura 51, é composta pela região Baixo Planalto Pré-Litorâneo.

Figura 51 - Geomorfologia da área estudada



Fonte: Elaboração própria a partir da ferramenta ArcGis.

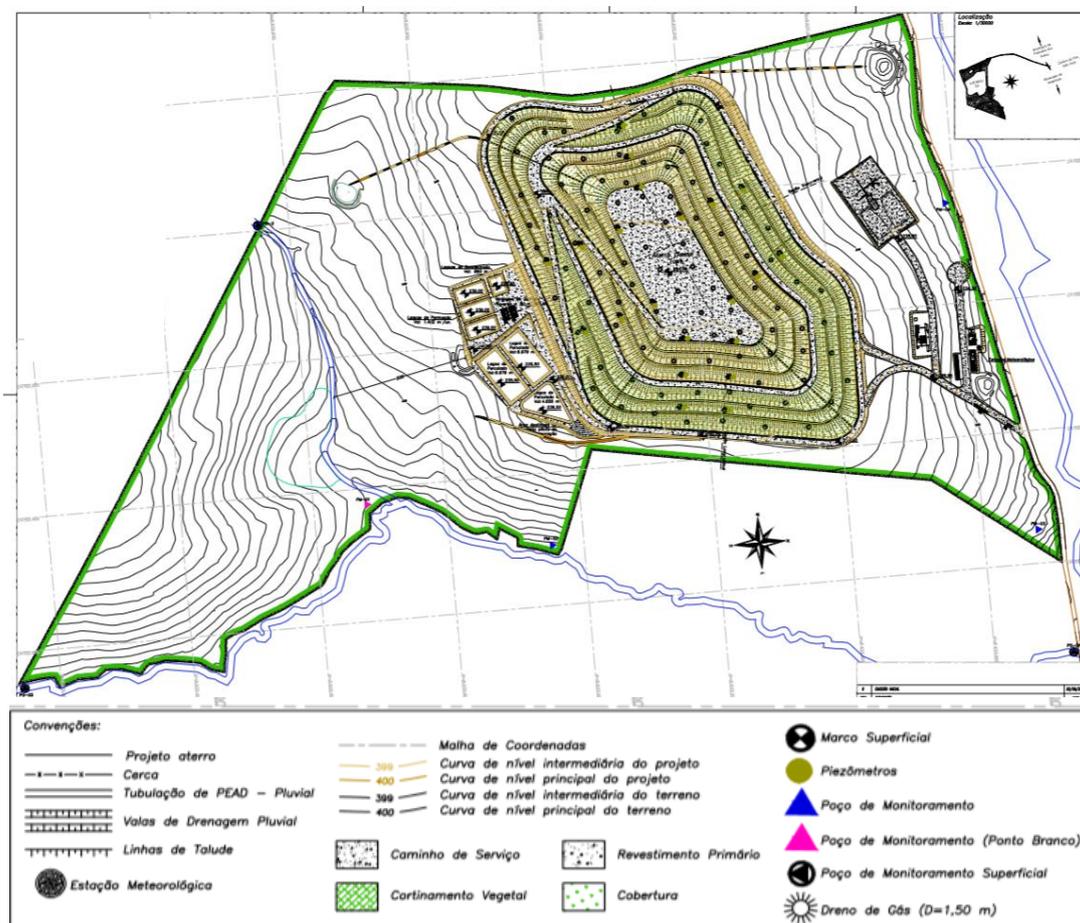
Essa forma de relevo é caracterizada por topos planos com elevadas altitudes e encostas predominantemente convexas e convexa-côncavas, serras e maciços montanhosos, refletindo os alinhamentos estruturais das rochas intensamente metamorfozadas cortadas por gargantas do tipo apalacheano.

As unidades pré-litorâneas compreendem um conjunto de formas de relevo esculpidas sobre o embasamento ígneo e metamórfico da faixa Móvel, constituído por gnaisse e granitóides, de idade paleoproterozóica, e kinzigitos, xistos e quartzitos, de idade neoproterozóica do grupo Macaúbas (DANTAS, 2015).

5.5 Aspectos Físicos e Técnicos do Aterro

A Central de Tratamento (CTR) do Agreste de Alagoas teve início da operação no ano de 2017 e possui vida útil de 20 anos. Possui uma área do terreno total de 81,34 hectares e uma capacidade estimada de resíduos classe II em mais de 3,9 milhões de m³. Recebe diariamente cerca de 400 toneladas de RSU de municípios e empresas do agreste do estado. Possui armazenamento temporário para resíduos Classe I, célula para resíduos Classe IIA e célula para recebimento de resíduos Classe IIB. A Figura 52 apresenta a planta final da CTR e a Tabela 24 a representatividade do uso do terreno.

Figura 52 - Projeto do Aterro Sanitário



Fonte: CTR AGRESTE, 2020.

Tabela 24 - Aproveitamento e representatividade da ocupação do terreno

<i>Tipo de ocupação</i>	<i>ÁREA (m²)</i>	<i>%</i>
<i>Terreno</i>	813.372,16	100,00
<i>Aterro Classe II</i>	231.260,79	28,43
<i>Unidades Auxiliares</i>	26.878,57	3,30
<i>Área destinada ao Tratamento de Percolado</i>	27.317,26	3,36
<i>Área Livre</i>	523.439,23	64,90

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de projeto do aterro.

De acordo com dados obtidos no aterro, a base da célula é impermeabilizada com camada de solo argiloso compactado e permeabilidade não superior a 1×10^{-7} cm/s, geomembrana de PEAD de 2 mm de espessura, geotêxtil de proteção da geomembrana com resistência a tração - $rt > 31$ kN/m e camada de solo de proteção com espessura mínima de 30 centímetros.

A cobertura diária é feita com o solo da própria escavação das valas (latossolo vermelho), que é armazenado em uma área de bota fora, do tipo argila pouco arenosa, amarelada e avermelhada, dura. As células encerradas possuem cobertura com manta PEAD para evitar aumento de volume de lixiviado e emissões fugitivas de biogás. O recalque do maciço do aterro é monitorado mensalmente por meio da topografia. A Figura 53 ilustra a impermeabilização de base e de cobertura de uma célula encerrada.

Figura 53 - Unidades do Aterro Sanitário



Fonte: Elaboração própria.

Drenagem de águas pluviais

O maciço é contornado por valetas com seção trapezoidal que conduz a água pluvial que escoar superficialmente pelo maciço, conduzindo a drenagem natural do terreno, sem que cause problemas de estabilidade ao aterro ou erosão do terreno.

Tratamento de gases

Atualmente é feito apenas a queima do gás através de 44 queimadores circunferenciado a 1,20m, estruturado com tela, pedra, tubo e flare, Figura 54. Existem ideias para aproveitamento desses gases com a implantação de usina para geração de energia.

Figura 54 - Tratamento de gases do aterro sanitário do Agreste



Fonte: Elaboração própria.

Drenagem e tratamento de lixiviados

O tratamento do lixiviado, proveniente da célula de recebimento de resíduos Classe IIA do aterro, é composta por duas lagoas anaeróbias em série, onde sofre um processo biológico, um filtro tipo Bag, onde sofre uma pré-filtrarção e sistema modular de separação por membrana instalado em um contêiner.

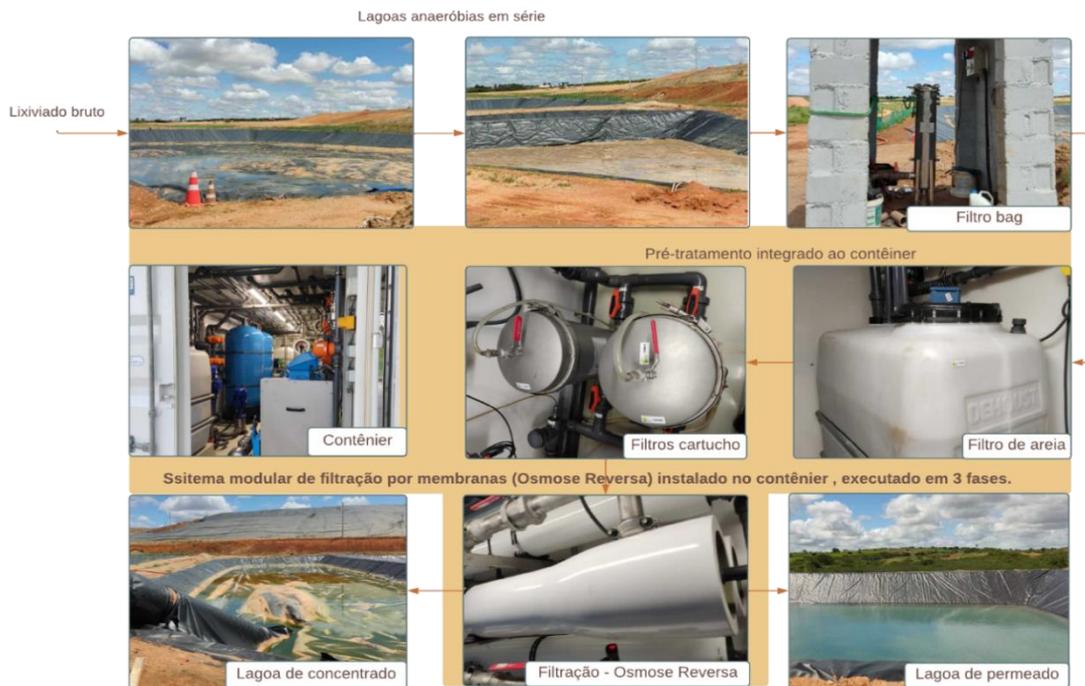
O sistema modular possui um pré-tratamento integrado composto de filtração em areia e posteriormente filtração em filtros tipo cartucho (14 filtros), seguido de filtração por osmose reversa e lavador de gases, Figura 55. O processo é automatizado e executado em 3 fases, com capacidade nominal de 130 m³/dia de lixiviado de forma a atender as legislações ambientais vigentes.

O efluente tratado segue para uma lagoa de permeado e utilizado como água de reuso na própria área do aterro. A fração de concentrado é disposto em uma lagoa de contenção,

de onde é recirculada para o maciço, quando é necessário, não apresentando corpo de água receptor para dispor os rejeitos.

A Figura 55 apresenta imagens do sistema de tratamento de lixiviados do aterro sanitário da CTR do Agreste.

Figura 55 - Sistema de tratamento de lixiviado no aterro



Fonte: Elaboração própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em campo e laboratório que buscam representar o potencial de geração de gás metano da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário e a modelagem, através de ferramentas programas, na geração de metano durante a vida útil do aterro em dois cenários.

Para obtenção dos resultados foi realizado a caracterização gravimétrica dos RSU, a composição físico-química da fração orgânica dos RSU, ensaios de Produção Bioquímica de Metano da fração orgânica, modelagem de cenários na estimativa de geração de gás metano.

6.1 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

Foram selecionados 5 municípios para representar os RSU que chegam aos aterros, com 3 rotas de coleta para a cidade de Arapiraca, duas rotas para Palmeira dos Índios (representativa dos municípios que fazem fronteira com o estado de Pernambuco) e uma rota para as cidades de Teotônio Vilela e Campo Alegre (representativas dos municípios da região central) e uma de Penedo (representativa dos municípios da região ribeirinha do São Francisco). A Tabela 25 apresenta o IDHM e a renda per capita por trabalhador nos municípios selecionados, e, para efeito de comparação, a Figura 56 apresenta estes mesmos indicadores médio das cidades que integram cada região.

Tabela 25: IDHM e Renda Per Capita das 5 cidades estudadas do aterro do agreste alagoano.

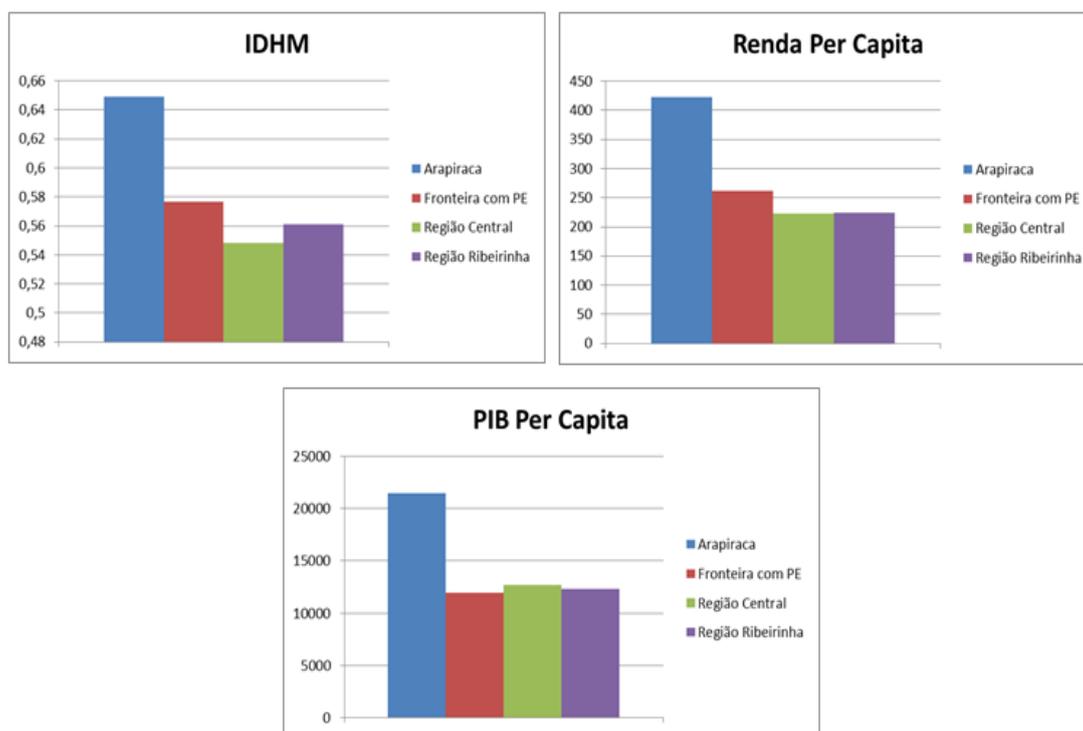
Indicador	Grupo 1 – R. fronteira com PE		Arapiraca	Grupo 2 - R. central		Grupo 3 - R.ribeirinha
	Palmeira dos Índios			Campo Alegre	Teotônio Vilela	Penedo
IDHM	0,638		0,649	0,57	0,564	0,63
Renda Per Capita	391,37		423,28	217,72	244,39	339,15
PIB per-capita	12934,16		21468,19	8940,84	11452,33	12505,56

Tabela 26 - IDHM e Renda Per Capita das cidades das regiões estudadas do aterro

Indicador	Arapiraca	Média das cidades – Fronteira com Pernambuco	Média das cidades - Região Central	Média das cidades - Região Ribeirizinha
IDHM	0,649	0,577	0,548	0,561

Renda <i>Per Capita</i>	423,28	261,91	223,53	223,96
PIB <i>Per Capita</i>	21468,19	11942,43	12.675,94	12293,52
Escala do IDHM - Muito Baixo = 0 a 0,499 / Baixo= 0,500 a 0,599 / Médio= 0,600 a 0,699 / Alto= 0,700 a 0,799 / Muito Alto = 0,800 a 1,000.				
Fonte: Atlas, 2020 e Seplag, 2022.				

Figura 56 - IDHM, Renda e PIB médio por região.



Fonte: Elaboração própria.

O município de Arapiraca apresenta os melhores indicadores de IDHM, Renda e PIB da região. Isso se deve por ser a segunda maior cidade do estado de Alagoas, com uma economia forte voltada para o comércio, serviços e agricultura. Os municípios da região com fronteira com PE apresentam IDHM superior às demais regiões, seguida pelas cidades da região ribeirinha e cidades da região central, mas ainda assim todas estão abaixo da média geral, que é de 0,58. Em relação à renda per capita apenas Arapiraca está acima da média geral, que é de R\$283,17. As demais regiões apresentam rendas inferiores à média, sendo a região com fronteira com PE com valor maior que a região central e ribeirinha. Quando analisado o PIB, todas as regiões estão acima da média geral, que é de R\$11.676,02, sendo Arapiraca com PIB mais elevado e as demais regiões com PIB muito parecidos.

No Apêndice A estão todos os indicadores socioeconômicos de todas as cidades que compõem o aterro sanitário do agreste alagoano.

Os valores médios da composição gravimétrica dos RSU, das cidades selecionadas como representativas para o aterro, estão apresentados na Tabela 27.

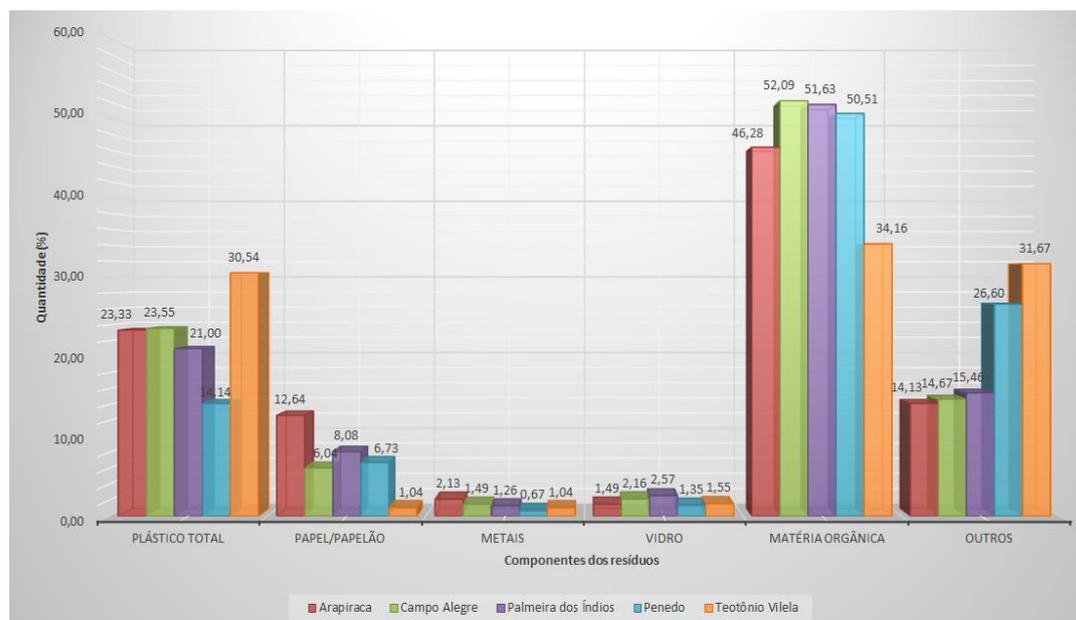
Tabela 27 - Composição gravimétrica dos RSU das cidades selecionadas

COMPONENTES	R1 fronteira		R2 central		R3 ribeirinha	
	<i>Arapiraca</i>	<i>Palmeira dos Índios</i>	<i>Campo Alegre</i>	<i>Teotônio Vilela</i>	<i>Penedo</i>	
RECICLÁVEIS	Plástico Rígido	<i>7,01</i>	<i>4,76</i>	<i>6,15</i>	<i>12,42</i>	<i>3,37</i>
	Plástico Flexível	<i>16,32</i>	<i>16,24</i>	<i>17,40</i>	<i>18,12</i>	<i>10,77</i>
	Papel/Papelão	<i>12,64</i>	<i>8,08</i>	<i>6,04</i>	<i>1,04</i>	<i>6,73</i>
	Metais	<i>2,13</i>	<i>1,26</i>	<i>1,49</i>	<i>1,04</i>	<i>0,67</i>
	Vidro	<i>1,49</i>	<i>2,57</i>	<i>2,16</i>	<i>1,55</i>	<i>1,35</i>
TOTAL RECICLÁVEIS	<i>39,59</i>	<i>32,91</i>	<i>33,24</i>	<i>34,17</i>	<i>22,89</i>	
ORG	Matéria Orgânica (resíduos de comida)	<i>46,28</i>	<i>51,63</i>	<i>52,09</i>	<i>34,16</i>	<i>50,51</i>
OUTROS	Sanitários	<i>9,03</i>	<i>8,77</i>	<i>10,90</i>	<i>13,98</i>	<i>17,17</i>
	Trapos (têxteis)	<i>1,72</i>	<i>2,59</i>	<i>0,96</i>	<i>15,01</i>	<i>3,37</i>
	Couros	<i>0,31</i>	<i>0,12</i>	<i>0,06</i>	<i>0,10</i>	<i>0,34</i>
	Borracha	<i>0,30</i>	<i>0,75</i>	<i>0,05</i>	<i>0,00</i>	<i>4,04</i>
	Madeira	<i>0,24</i>	<i>0,32</i>	<i>0,31</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
	Terra e Similares	<i>2,54</i>	<i>2,90</i>	<i>2,39</i>	<i>2,59</i>	<i>1,68</i>
TOTAL OUTROS	<i>14,14</i>	<i>15,45</i>	<i>14,67</i>	<i>31,68</i>	<i>26,6</i>	
TOTAL	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>	

Fonte: Elaboração própria.

A composição gravimétrica dos componentes dos resíduos das 5 cidades estudadas, para fornecer uma amostra representativa das subdivisões dos grupos dos resíduos do aterro do agreste alagoano, podem ser vistas na Figura 57.

Figura 57 - Composição gravimétrica dos RSU das 5 cidades estudadas do aterro do agreste alagoano



Fonte: Elaboração própria.

Os dados da Tabela 27 mostram que Arapiraca é a que gera maior quantidade de material potencialmente recicláveis (39,6%), seguida pelos municípios que estão na região central que estão no seu entorno (Campo Alegre com 33,2% e Teotônio Vilela com 34,2%). Depois vem Palmeira dos Índios, na fronteira com Pernambuco com 32,9% e Penedo na região ribeirinha com 22,9%.

Por ser uma cidade com comércio forte na região, e possuir melhor economia das cidades estudadas, o município de Arapiraca apresentou altos índices de papel/papelão, plásticos e metais. As cidades de Teotônio Vilela e Penedo apresentaram baixos índices desses componentes. No entanto, no item plástico as cidades de Teotônio e Arapiraca apresentaram percentual alto nesta categoria, possivelmente por possuírem atividades de comércio com presença de supermercados, lanchonetes e etc.

O índice de vidro foi menor na cidade de Arapiraca e Penedo. Por Arapiraca ser uma região de comércio e serviços, a tendência era alto valor, contrariando a tese de que cidades com baixo desenvolvimento econômico apresentam menor valor desse material. No entanto, por ser uma cidade em que os caminhões fazem a coleta de vários bairros e regiões em uma única rota, as amostras coletadas podem ser oriundas de setores com alta concentração de supermercados, e escolas na região. A cidade de Campo Alegre apresenta a segunda menor quantidade de papel/papelão, possivelmente, por ser um local

com uma população de baixo poder econômico e áreas com baixa economia que produzem poucos materiais recicláveis.

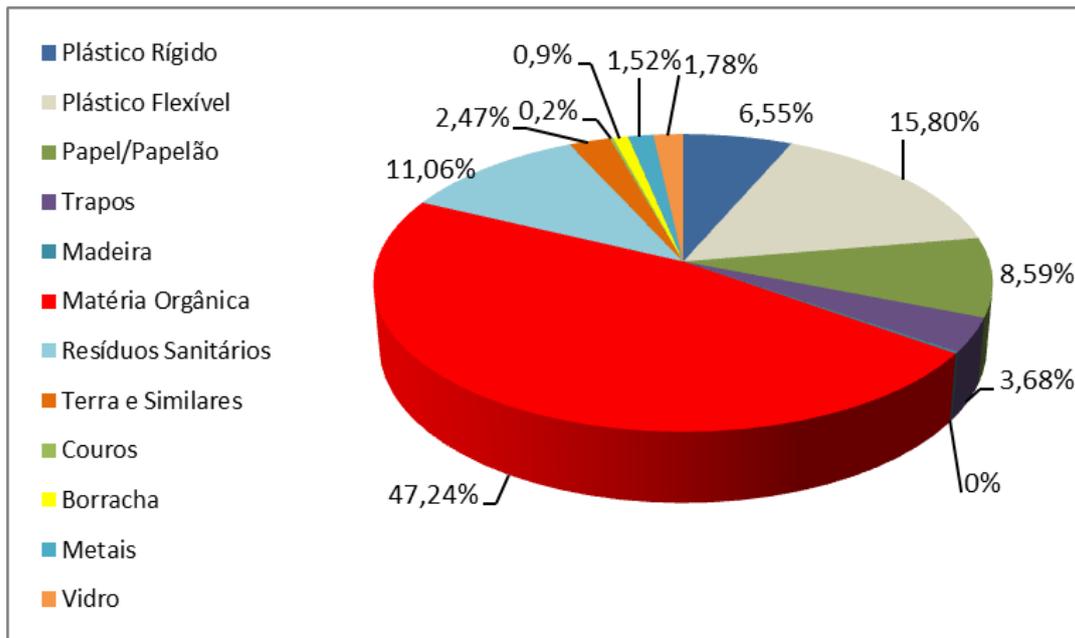
Quanto à presença de metais, as cidades de Teotônio Vilela e Penedo apresentaram um menor percentual. É possível explicar pela economia das regiões, em que Teotônio a população utiliza poucos produtos industrializados, além de que muitas pessoas que sobrevivem da coleta de materiais recicláveis, fazendo com que chegue uma menor quantidade no aterro. A cidade que apresentasse um índice mais elevado, no entanto, talvez, catadores estejam coletando este componente antes da sua disposição final no aterro.

Com relação à presença de matéria orgânica, os dados mostraram que a cidade que apresenta maior percentual de matéria orgânica é o município de Campo Alegre (52,09%), seguida de Palmeira dos Índios (51,63%) e Penedo (50,51%). A que apresenta o menor percentual de M.O é a cidade de Teotônio Vilela (34,16%). Levando em consideração o desenvolvimento socioeconômico dessas cidades (Tabela 24) a expectativa era que a o município de Teotônio Vilela apresentasse um maior índice de matéria orgânica em relação às outras cidades, por ser um local em que o IDHM e renda per capita são menores que nas outras cidades, além de ter uma economia voltada para a agricultura e pecuária com menor consumo de produtos industrializados. Uma possível explicação é o fato da população utilizar os componentes orgânicos como alimento para animais e adubo para as plantações, o que diminui a quantidade de M.O gerada por sua população.

Arapiraca também apresentou baixo percentual de orgânicos comparativamente a outras cidades (46,28%). Isso pode ser explicado devido à metodologia adotada ter feito análise, também, dos resíduos do centro da cidade, pois se trata de um município com forte atividade no setor de comércio da região, em que os índices de M.O são menores. Corroborando o fato de que a geração de materiais recicláveis em locais com forte influência comercial e grande fluxo de pessoas é proporcionalmente maior do que a de resíduos orgânicos e rejeitos (STEINER, 2010).

A Figura 58 apresenta o valor médio geral da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos recebidos no aterro do agreste alagoano.

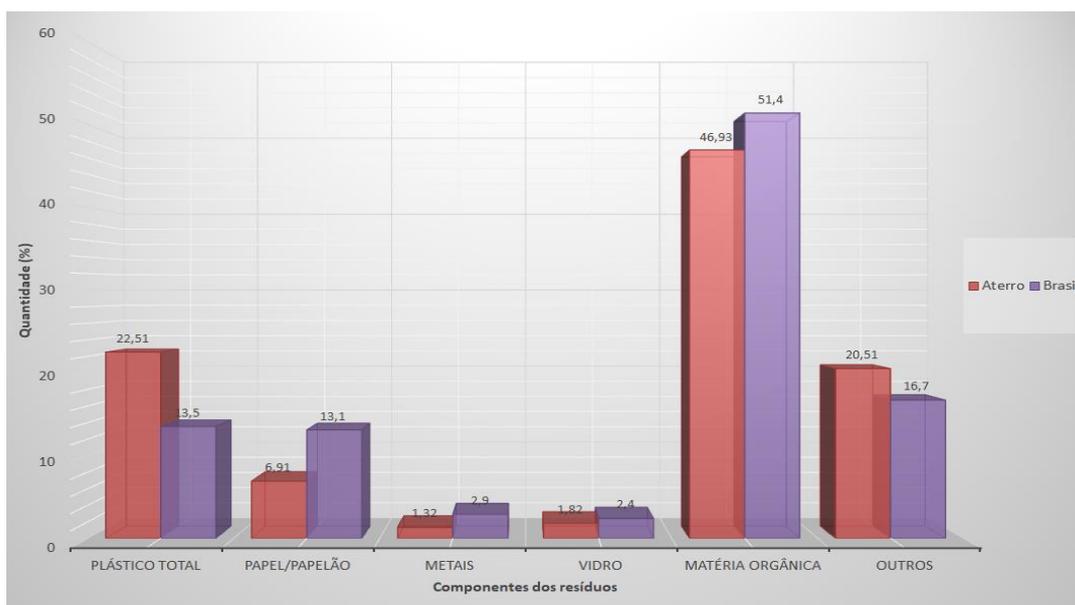
Figura 58 - Composição gravimétrica dos RSU do aterro do agreste alagoano



Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser observado na Figura 58, o maior percentual, aproximadamente 47,3% dos resíduos sólidos do aterro, é de matéria orgânica, seguido de plástico flexível (15,80%) e resíduos sanitários (11,06%). Os componentes em menores quantidades são o couro com 0,22%; madeira com 0,2% e borracha com 0,9%. A Figura 59 apresenta uma comparação da composição gravimétrica média do aterro e do Brasil. Os dados da composição média do Brasil foram adaptados do Ministério de Meio Ambiente (2012) que apresentou dados da gravimetria do Brasil no ano de 2010.

Figura 59 - Comparação da composição gravimétrica média dos RSU do Aterro e do Brasil



Fonte: Elaboração própria.

É possível observar que o percentual médio da matéria orgânica (MO) presente no aterro está próxima da média nacional, ficando 4,5% abaixo. Estavam presentes nessa matéria orgânica principalmente restos de alimentos, galhos e folhagens em geral, além de resíduos provenientes da produção e comércio de produtos orgânicos como frutas, verduras, legumes, cana-de-açúcar, casca de cocos, dentre outros.

No entanto comparando com países desenvolvidos o índice de matéria orgânica é bastante alto. Segundo Hoornweg (2012), a fração de matéria orgânica em cidades de países desenvolvidos, como Estados Unidos, é em torno de 28% e dentre muitos fatores o poder econômico é preponderante, pois, quanto menor a economia de uma região maior é a fração de matéria orgânica.

Uma explicação para o alto percentual de MO do agreste alagoano seria o baixo poder aquisitivo da população que, segundo dados do Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2013), possui uma renda per capita média de R\$ 385,24; aproximadamente 30% da população é pobre e 14% é extremamente pobre. A renda dos municípios está abaixo da renda per capita de Alagoas, que segundo IBGE (2010) é de R\$ 604,00 e bem menor quando comparada em nível nacional, em que a renda média do brasileiro é de R\$ 1.052,00. Outra explicação pode ser que a cidade tenha alguma deficiência do setor de produção de alimentos que tem como consequência altos índices de desperdício. Grande parte dos estudos de caracterização gravimétrica encontrados na literatura também obteve como fração majoritária os resíduos orgânicos, demonstrando que o desperdício é ainda uma prática muito comum (AL-KHATIB et al., 2010; OGWUELEKA, 2013; JADOON et al., 2014; EDJABOU et al., 2015; ALKMIN & UBERTO JÚNIOR, 2017; BEZERRA e CAMPOS, 2019)

A quantidade de plásticos gerais ficou com índice elevado quando comparado com a média nacional. Essa elevada percentagem se deve, principalmente, a quantidades de sacolas utilizadas em compras de supermercados pela população e sua utilização em acondicionamento de resíduos sólidos.

De acordo com Landim et al. (2016), o uso de embalagens tem se tornado indispensável para a sociedade, pois desempenha diversas funções importantes para a venda e para garantir a qualidade do produto. Portanto, é possível compreender a grande quantidade de embalagens plásticas encontradas na amostra em análise.

Atualmente estes plásticos são dispostos no mercado em diferentes formas, sendo utilizados para confecção de sacolas, embalagens e produtos para os mais diversos fins. Essas sacolas e embalagens vêm substituindo, cada vez mais, outros materiais (papel/papelão, vidro), provavelmente devido a maior facilidade de fabricação e reaproveitamento e a maior viabilidade econômica, fato que faz com que estes materiais sejam consumidos e descartados desordenadamente (SILVA et al., 2012).

Mesmo os plásticos não sendo a maior parcela dos RSU, seu teor elevado merece preocupação, uma vez que gera um alto custo para o meio ambiente, primeiramente, por serem produzidos a partir de recursos naturais não renováveis (petróleo), por emitirem gases tóxicos e de efeito estufa e finalmente por serem, na maioria das vezes, descartados de maneira inadequada (PINTO et al., 2014).

O percentual médio de metais e vidros é menor em comparação à média nacional, isso pode ser explicado também por questões econômicas, já que muitas pessoas coletam latas e garrafas de vidro para sua sobrevivência, chegando assim poucas quantidades desse material no aterro. A maior parte dos vidros coletados na pesquisa era de garrafas quebradas.

O índice de papel/papelão é cerca de 7% menor que a média nacional, isso pode ser devido à substituição do papel por sacolas plásticas, e até mesmo devido à existência de muitas pessoas que coletam esse material para vender em cooperativas e empresas de reciclagens como meio de sobrevivência.

Na literatura (BANDARA et al, 2007; LAKIOTI et al, 2017; TRANG et al, 2017; NAMLIS e KOMILIS, 2019; MENEZES et al, 2019), é possível encontrar pesquisas estabelecendo relações entre geração de resíduos sólidos e classe socioeconômica. Nelas, é possível verificar que a quantidade e a composição dos resíduos são afetadas de acordo com os padrões de vida ou a renda média das pessoas. Além disso, outros fatores também podem afetar a quantidade e a composição, como o clima, hábitos de vida, nível de educação, crenças religiosas e culturais e atitudes sociais e públicas. Os estudos mostram uma relação de que quanto menor a renda da população, maior é o índice de matérias orgânicas geradas e uma correlação direta entre as frações de recicláveis e a renda per capita da população, ou seja, o aumento da renda resulta em aumento do poder aquisitivo e, conseqüentemente, do consumo de bens, sendo que os produtos adquiridos são, muitas

vezes desenhados para uso e descarte, incrementando, assim, a fração de recicláveis presente nos resíduos sólidos.

Estudos de composição gravimétrica realizados nas cidades do agreste alagoano, em anos anteriores (2015 e 2016), demonstram a presença de diferentes percentuais dos componentes físicos na massa dos RSU. Dados da SEMARH (Alagoas, 2015 e Santana, 2016) apresentam valores, para as mesmas cidades analisadas por este trabalho, de aproximadamente 65% de matéria orgânica e cerca de 14% de plásticos.

A diferenciação dos percentuais da pesquisa atual, com as desenvolvidas por estes autores, pode estar associada aos hábitos de consumo da população e ao aumento do seu poder aquisitivo ao longo do tempo, justificando a redução no teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, o acréscimo de recicláveis. Além disso, as diferentes metodologias utilizadas para a seleção de amostras e caracterização dos RSU também podem contribuir para tal diferenciação, uma vez que não existe, no Brasil, uma padronização para realização de tais composições.

6.2 CÁLCULO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O cálculo da quantidade de RSU que serão destinados ao aterro foi realizado a partir da população para cada ano de vida útil do aterro sanitário e da geração per capita de RSU.

As equações de crescimento que apresentaram o melhor ajuste e que foram utilizadas para o cálculo de projeção populacional dos municípios que destinam seus RSU para CTR Agreste, bem como os seus coeficientes de correlação (R^2) estão apresentados no apêndice B.

Na Tabela 28 estão indicadas as previsões de população dos municípios que dispõem os RSU no Aterro Sanitário do Agreste Alagoano por um período de 20 anos.

Observa-se que para o ano de 2021 a população urbana atendida pelo aterro ultrapassa os 575 mil e tem expectativa que até nos próximos 20 anos, mais de 713 mil habitantes destinem os resíduos sólidos para o aterro sanitário. O apêndice C apresenta os dados das projeções individuais, da população urbana, de cada cidade.

Tabela 28 - Estimativa populacional dos municípios que destinam os resíduos para o aterro do CONAGRESTE

Ano	População	Ano	População
2021	577932	2032	645864
2022	585193	2033	652603
2023	591872	2034	659339
2024	598682	2035	666074
2025	605884	2036	672808
2026	612175	2037	679541
2027	618389	2038	686279
2028	625651	2039	699735
2029	632390	2040	706468
2030	639129	2041	713198
2031	979248	-	-

Fonte: Elaboração própria.

No apêndice D estão apresentados os dados anuais levantados, quantidade em toneladas, de resíduos Classe IIA pesados na balança do aterro do Agreste no ano de 2020 e 2021, bem como o *per capita* calculado a partir desses dados. Observa-se que o aterro recebeu, em média, cerca de 406 e 476 toneladas de RSU por dia no ano 2020 e 2021 respectivamente, considerando somente os RSU de responsabilidade dos municípios.

Verifica-se que o município de Arapiraca foi o principal gerador, representando cerca de 44% do total de RSU destinados ao aterro sanitário. Além dos resíduos municipais, o aterro recebeu de empresas privadas mais de 5,9 mil toneladas de resíduos classe IIA nos anos de 2020 e 2021, representando cerca de 4% no total de resíduo desse tipo que é destinado ao aterro.

Diante da ausência, ou incoerência, dos dados levantados pelo SNIS para geração *per capita* de RSU, entre os anos de 2009 e 2019, para a maioria dos municípios, foi impossível realizar a análise de regressão. Através dos dados de Jucá (2002), realizou-se a projeção como mostra a Tabela 29.

Observa-se que a geração *per capita* de RSU apresentou crescimento de 37,80% no período analisado de 2021 a 2041, com taxa média de incremento de 1,7 % ao ano.

Tabela 29 - Estimativa de geração per capita de RSU dos municípios que destinam os resíduos para o aterro do CONAGRESTE.

Ano	Pop.	Per Capita (kg/hab.dia)	RSU (t/ano)	Ano	Pop.	Per Capita (kg/hab.dia)	RSU (t/ano)
2021	577932	0,82	172975,05	2032	652603	0,99	235818,0941
2022	585193	0,84	179420,17	2033	659339	1,01	243065,3224
2023	591872	0,85	183628,29	2034	666074	1,03	250410,5203
2024	598682	0,87	190111,47	2035	672808	1,04	255397,9168
2025	605884	0,89	196821,42	2036	679541	1,06	262914,4129
2026	612175	0,90	201099,49	2037	686279	1,07	268026,2635
2027	618389	0,92	207655,03	2038	699735	1,09	278389,5698
2028	625651	0,93	212377,23	2039	706468	1,10	283646,902
2029	632390	0,95	219281,23	2040	713198	1,12	291555,3424
2030	639129	0,96	223950,80	2041	721275	1,13	297489,8738
2031	645864	0,98	231025,55	-	-		

Fonte: Elaboração própria.

6.3 ENSAIOS DE PRODUÇÃO BIOQUÍMICA DE METANO

A realização dos ensaios de produção de biometano foi feita apenas com a fração da matéria orgânica presente nos RSU que chegam ao aterro, com e sem lodo de inóculo. Para tanto, inicialmente, foi feita a caracterização físico química da matéria orgânica dos RSU e do lodo de inóculo utilizado nos ensaios. Em seguida foram operados 7 reatores em batelada, sendo 3 apenas com a matéria orgânica dos RSU, 1 branco somente com lodo de inóculo, e 3 com a matéria orgânica dos RSU e lodo de inóculo. Por fim, com os resultados de operação dos reatores foram calculados os parâmetros cinéticos k e L_0 .

6.3.1 Caracterização físico-química da fração orgânica

Os resultados das análises físico-químicas nas amostras de fração orgânica do meio reacional, submetidas à biodigestão anaeróbia, estão dispostos na Tabela 30.

Tabela 30 - Caracterização do substrato

Parâmetro	Unidade	Substrato
Teor de umidade	%	73,5
pH	-	4,67
DQO	mg.L ⁻¹	59.511,54
ST	g.L ⁻¹	39,96
STV	g.L ⁻¹	31,87
STF	g.L ⁻¹	7,27
STV/ST	(%)	80,77

Fonte: Dados da pesquisa

6.3.1.1 Teor de Umidade

A amostra coletada apresentou uma umidade de 73,5%. O valor está acima da média nacional que, segundo Lima (2004) e Silva (2016), é de 60% e pode ser atribuído ao quantitativo de matéria orgânica presente nas amostras.

No entanto, os valores estão próximos da faixa sugerida na literatura (LAY *et al.*, 1996; ALCÂNTARA, 2007; SILVA, 2012) de que os teores de água adequada para o processo de degradação dos resíduos e elevar a produção de metano no aterro variam entre 50% a 70% e que teores fora dessa faixa podem interferir na biodegradação, comprometendo o desenvolvimento dos micro-organismos e conseqüentemente das suas funções vitais.

A elevada umidade observada na matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos pode estar associada às condições climáticas da região no momento da coleta e interferir na taxa de biodegradação em que os resíduos chegaram ao aterro. Nos meses de abril a agosto há uma maior precipitação na região em estudo, o que favorece a um aumento considerável no percentual do teor de água dos resíduos. Já nos meses de setembro a março por serem períodos mais secos existe uma tendência à redução do teor de água nos RSU do aterro. De modo geral, o teor de água apresentou-se dentro dos limites de faixa para biodegradação e geração de gás metano.

6.3.1.2 Potencial Hidrogeniônico - pH

O valor de pH determinado para a matéria orgânica foi de 4,67, sendo considerado ácido e estando situado entre os valores reportados na literatura para aterros, que variam de 3,52 a 5,01 (BOUALLAGUI *et al.* 2009; LI *et al.*, 2013; ALVES, 2016; MALINOWSKY, 2016; MAGALHÃES, 2018); e está coerente com o valor encontrado no aterro da capital alagoana, cujo valor médio é de 4,8, conforme estudo desenvolvido por Tavares (2008).

A avaliação do pH é fundamental no processo de biodegradação dos resíduos sólidos, uma vez que o comportamento deste parâmetro está diretamente relacionado ao desenvolvimento das fases de degradação da matéria orgânica, podendo suas variações acelerar ou inibir o processo biodegradativo. O valor observado é característico dos resíduos orgânicos recém-gerados, enquanto valores de pH mais elevados são indicativos do processo de decomposição mais avançado (MAGALHÃES, 2018).

6.3.1.3 DQO

A demanda química de oxigênio (DQO) foi utilizada como parâmetro de quantificação da matéria orgânica presente no substrato, tendo sido observado o valor de 59.511,54 mg/L. O valor da DQO encontrada está coerente com os encontrados na literatura. Oliveira (2018) apresentou valor de DQO de 76000mg/L para o resíduo orgânico. Magalhães (2018) encontrou valores que variavam de 46,36g/L e 138g/L de DQO de resíduos alimentares. Gueri (2017) apresentou trabalhos com valores que variavam de 34.460mg/L a 101.010,00mg/L de DQO de resíduos orgânicos e valores nessas faixas mostram-se bastantes promissores à produção de biogás.

6.3.1.4 Teor de Sólidos

A análise de teor de sólidos totais (ST), voláteis (STV) e fixos (STF) foi realizada a fim de avaliar o percentual dos sólidos orgânicos e inorgânicos presente nas amostras coletadas visto que a fração orgânica, assim como a DQO, tem influência na geração de gás metano. O valor dos sólidos voláteis da amostra foi de 80,77%, o que de acordo com Silva (2016), apresenta uma maior quantidade de matéria orgânica a ser decomposta e comprova que o resíduo é recém-gerado. Estudos na literatura, (ZHANG et al., 2007; FIRMO, 2013; LUCENA, 2016; SILVA 2016; MAGALHÃES, 2018; HASAN, 2016), apresentaram valores de sólidos voláteis dos resíduos orgânicos para digestão anaeróbia, com perfil de alta biodegradabilidade e com grandes chances de sucessos em sistemas anaeróbios.

6.3.2 Caracterização físico-química do lodo

O lodo utilizado como inóculo nos ensaios de biometano foi proveniente de um reator UASB de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) de um condomínio residencial. Os

resultados das análises físico-químicas realizadas para a caracterização do inóculo (lodo de reator UASB) estão dispostos na Tabela 31.

Tabela 31 - Caracterização do inóculo

Parâmetro	Unidade	Lodo
pH	-	6,38
ST	g.L ⁻¹	30,50
STV	g.L ⁻¹	24,37
STF	g.L ⁻¹	6,12
STV/ST	%	79,90

Fonte: Dados da pesquisa

Conforme observado na Tabela 31, o Lodo (inóculo) apresenta valor de pH de 6,38, o que mostra uma tendência para a neutralidade. Próximos à neutralidade, pH entre 6 a 8, os microrganismos produtores de metano atingem uma estabilidade na formação do metano (CHERNICARO, 2007).

A amostra do lodo apresentou teor de sólidos voláteis de 24,37 e relação SV/ST de 0,799, dentro de valores reportados na literatura. Magalhães encontrou valores superiores a 0,68 de SV/ST. Lima (2015) apresentou valores de SV/ST variando entre 0,57 – 0,68. Lima (2016) encontrou valores de 0,81 e 0,83 para o lodo utilizado como inóculo na digestão anaeróbia. Oliveira (2018) encontrou valores que variavam de 0,44 a 0,76.

6.3.3 Produção de Metano

A duração da operação dos reatores de ensaio de produção de biometano está apresentada na Tabela 32, tendo, os reatores, sido desativados conforme a produção de metano atingia a estabilidade. O momento de estabilização foi determinado avaliando-se a curva de produção acumulada de metano ajustada ao modelo de Gompertz modificado, e caracterizado pela obtenção de volumes de metano acumulado semelhantes em análises consecutivas.

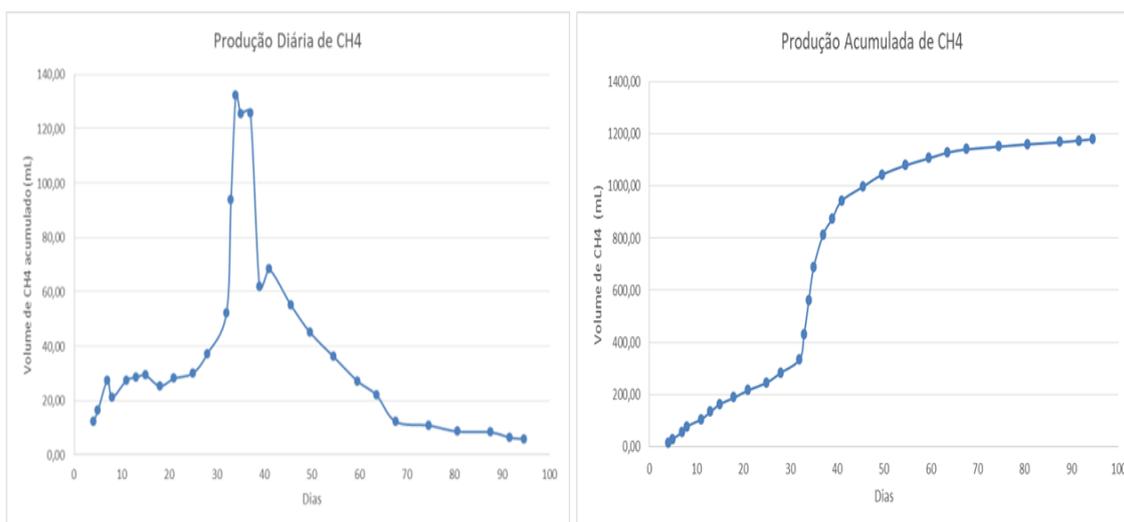
Tabela 32 - Duração de operação dos reatores.

Reator	Tempo de operação (dias)
1, 2 e 3 - substrato	95
4 – lodo de inóculo	50
5, 6 e 7 – substrato + lodo de inóculo	64

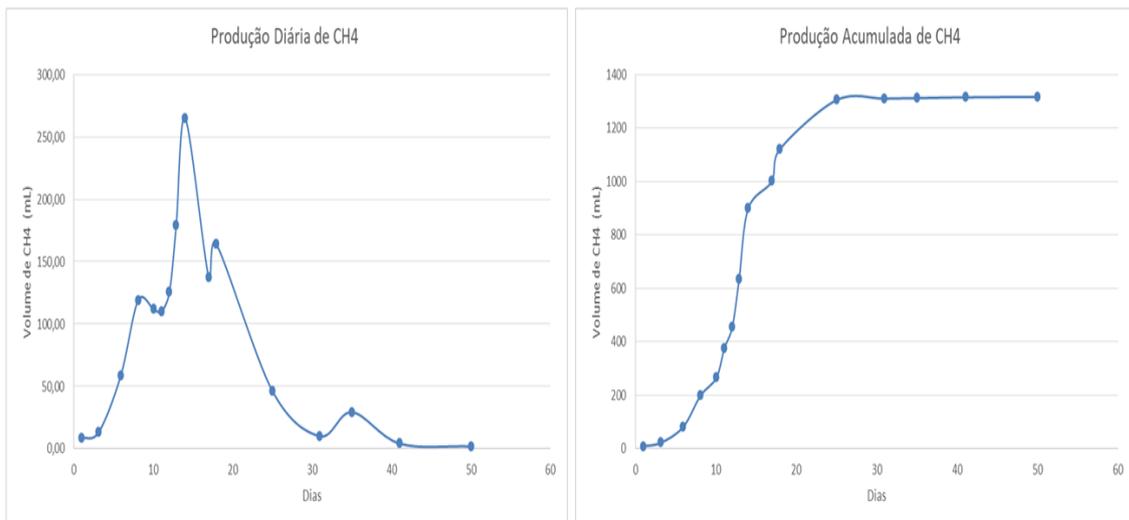
Fonte: Elaboração própria.

Os reatores 4 (branco) e 5, 6 e 7, que possuíam inóculo, encerraram primeiro a produção de metano. Já os reatores 1, 2 e 3, que não possuíam inóculo, foram mantidos em operação por mais tempo a fim de verificar se ainda haveria um aumento na produção de metano. Através da análise de variância e do teste Tukey, foi possível verificar que não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre os dados obtidos para as triplicatas dos reatores, o que garante confiabilidade à utilização dos valores médios.

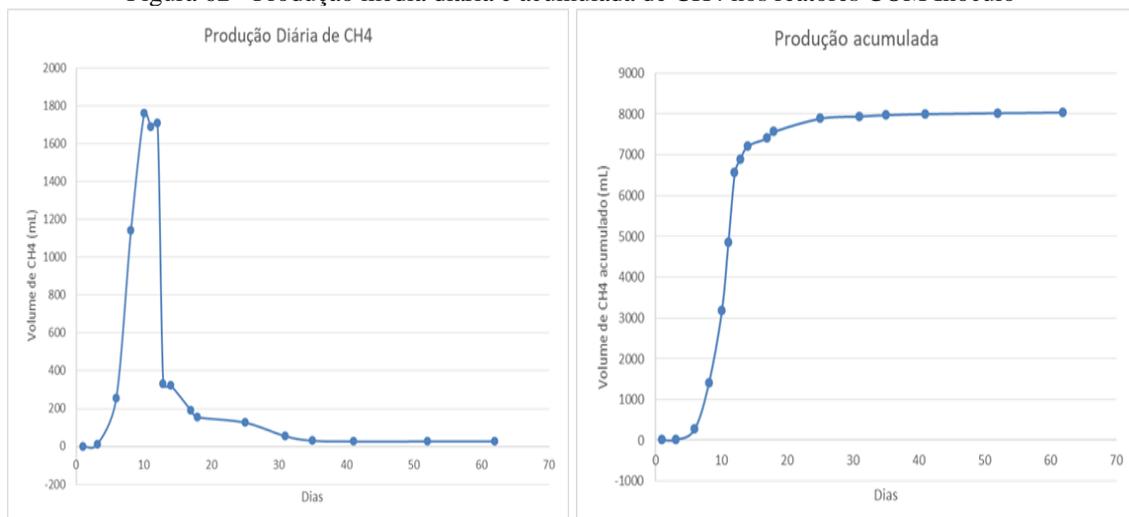
Nas Figuras 60 a 62 estão apresentados os volumes médios diários e acumulados de metano produzidos durante toda a operação dos reatores.

Figura 60 - Produção média diária e acumulada de CH₄ nos reatores SEM Inóculo

Fonte: Elaboração própria.

Figura 61 - Produção média diária e acumulada de CH₄ no reator do inóculo

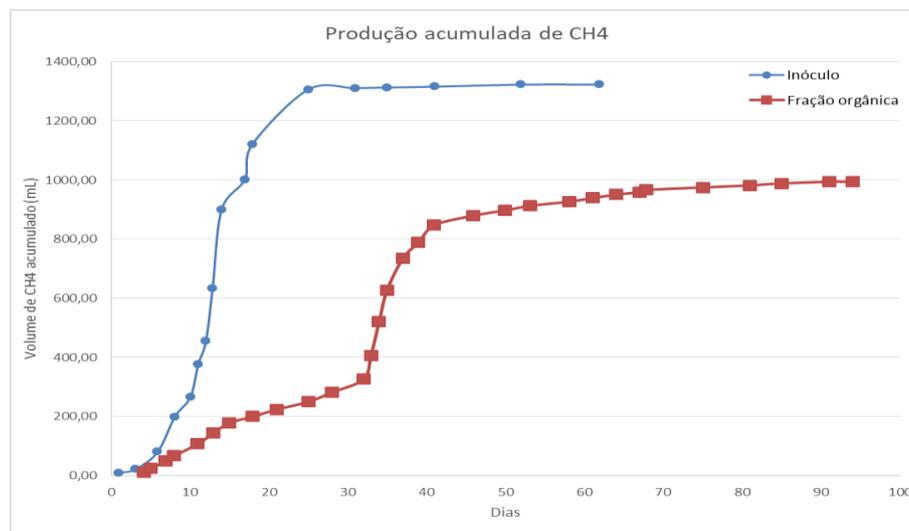
Fonte: Elaboração própria.

Figura 62 - Produção média diária e acumulada de CH₄ nos reatores COM Inóculo

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos gráficos das Figuras 60 a 62, pode-se verificar que os reatores somente com a fração orgânica dos RSU, foram os que produziram menos metano, seguido do reator apenas com lodo de inóculo. A Figura 63 mostra o gráfico comparativo da produção acumulada de metano desses reatores.

Figura 63 - Comparação das amostras individuais de inóculo e fração orgânica

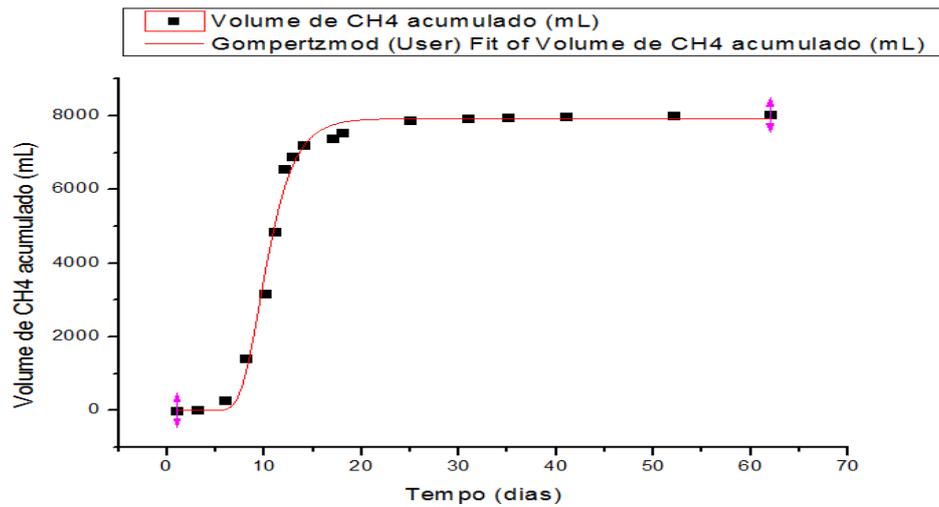


Fonte: Elaboração própria.

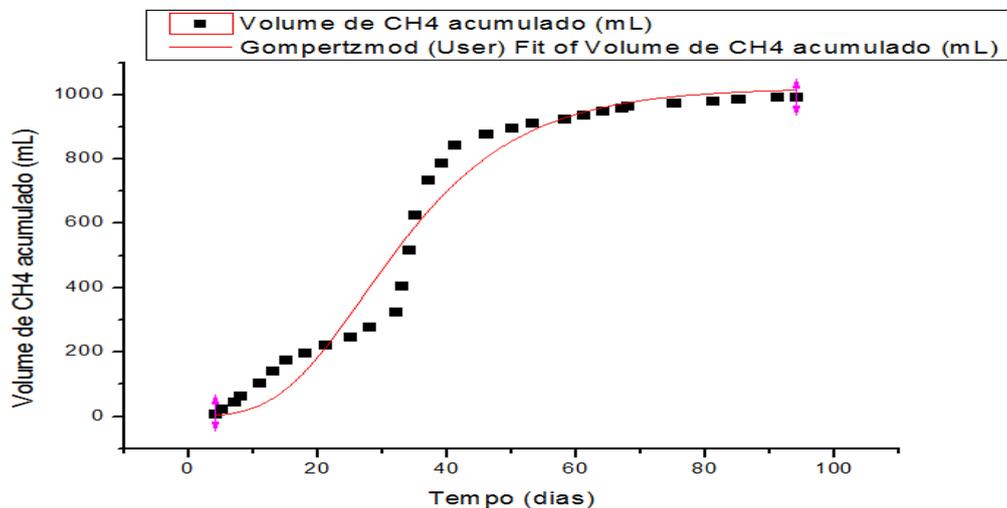
A produção máxima de metano dos reatores sem a presença de inóculo ocorreu mais tardiamente, ao 30º dia de análise, e continuou crescendo durante todo o período estudado (aproximadamente 100 dias), sem atingir a fase de estabilidade até sua desativação, indicando que a geração de gás metano poderia ser ainda maior do que a determinada no ensaio.

Os reatores que continham a fração orgânica do RSU + lodo de inóculo, foram os que apresentaram maior produção de metano. Esses reatores produziram os maiores volumes de metano nos primeiros dias de operação, atingindo seu pico de produção próximo ao 10º dia de operação, e estabilidade até a sua desativação com quase 65 dias de análise.

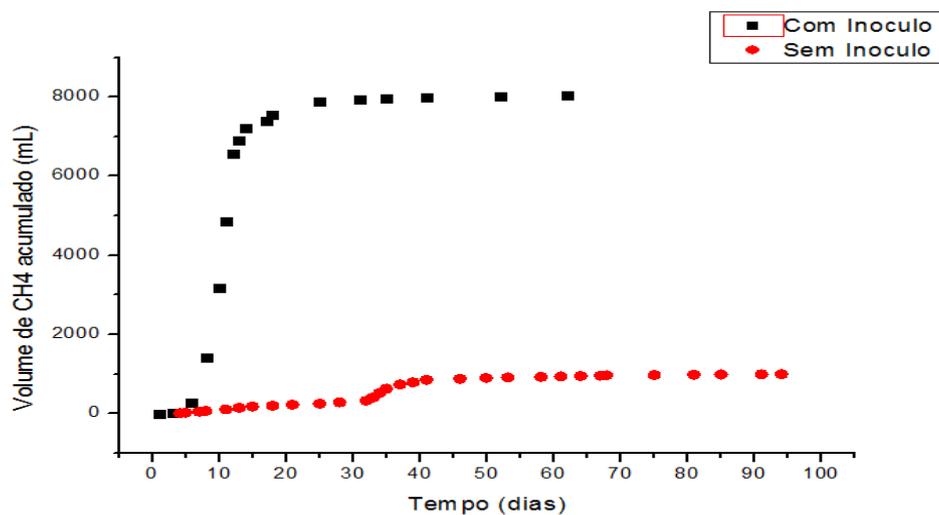
As produções acumuladas de metano ao longo do tempo de operação de cada amostra (com e sem inóculo), ajustada ao modelo de Gompertz modificado, podem ser vistas nos gráficos da Figura 64 e Figura 65. A comparação entre os volumes acumulados dos reatores com e sem inóculo pode ser vista na Figura 66.

Figura 64 - Produção acumulada de CH₄ ajustada ao modelo de Gompertz modificado - COM Inóculo

Fonte: Elaboração própria.

Figura 65 - Produção acumulada de CH₄ ajustada ao modelo de Gompertz modificado - SEM Inóculo

Fonte: Elaboração própria.

Figura 66: Comparação dos volumes acumulados de CH₄ dos reatores com e sem inóculo

Fonte: Elaboração própria.

As constantes cinéticas do modelo de Gompertz modificado, P (potencial de produção de metano), R_m (taxa de produção máxima de metano) e λ (tempo da fase lag), foram determinadas através de regressão não-linear e estão dispostas na Tabela 33.

Tabela 33 - Constantes cinéticas do modelo de Gompertz modificado e valores de R²

Amostra	Potencial de produção de metano (mL)	Taxa de produção máxima de metano (mL.d ⁻¹)	Tempo da fase lag (h)	R ²
Fração orgânica (reatores 1, 2 e 3)	1.020,42	98,40	13,90	0,99635
Inóculo (reator 4)	1301,24	112,25	10,777	0,96582
Fração orgânica + Inóculo (reatores 5, 6 e 7)	7.926,31	1691,16	7,56	0,99192

Fonte: Elaboração própria.

Segundo Ghasemian *et al.* (2016), o modelo de Gompertz modificado pode ser considerado eficaz no ajuste dos dados experimentais se todas as análises apresentarem coeficientes de determinação ajustados (R^2) maiores que 0,95. As curvas dos reatores sem inóculo (1, 2 e 3), do inóculo (4) e dos reatores com inóculo (5, 6 e 7) atenderam a esse requisito.

Quando comparada a produção de metano dos reatores apenas da fração orgânica (1.020,42 mL) com a produção do reator somente com lodo de inóculo (1.301,24 mL), observou-se que a geração acumulada de gás metano na amostra apenas com o lodo foi 21,58%. As taxas máximas de geração de metano do lodo de inóculo também foram maiores que a da fração orgânica, 112,25 mL/dia e 98,40 mL/dia, respectivamente. Isso pode ter acontecido devido a uma maior quantidade de sólidos voláteis presentes no lodo em comparação com as amostras da fração orgânica dos RSU sem inóculo.

No entanto, a produção de metano do lodo já tinha se estabilizado próximo ao dia 30, enquanto que a amostra sem inóculo, mesmo com 100 dias de análise, ainda não tinha chegado a uma estabilização, o que poderia ter resultado em um valor maior de metano acumulado.

De um modo geral, o resíduo da fração orgânica apresenta geração de gás metano mais lenta do que o lodo, pois o lodo apresenta maior disponibilidade de nutrientes associada à água no meio. Alves (2008) ressalta que o potencial de geração de metano dos resíduos é considerado superior ao do lodo, uma vez que a matéria orgânica presente nos resíduos

é superior à matéria orgânica presente no lodo. No entanto a geração nos resíduos apresenta comportamento mais lento e gradual.

Verificou-se que o maior volume da produção de metano foi observado nos reatores com a amostra de Fração Orgânica + Inóculo, com total de 7926,31 mL, que obteve também a maior taxa de produção máximo de metano de 1691,16 mL.d⁻¹. O valor do potencial de produção de gás metano foi significativamente maior do que a soma dos potenciais das amostras contendo apenas inóculo ou a fração orgânica.

De acordo com Alves (2008), este fato pode ser caracterizado por uma reação bioquímica conhecida por sinergismo, no qual o efeito total da ação combinada é superior à soma dos efeitos de cada substância separadamente. Hasan et al. (2017) mostraram que o efeito sinérgico entre as biomassas combinadas resultou em melhores índices de produção de biogás e de metano, se comparado às amostras tratadas de forma individual e amostras com maior participação de lodos tiveram os melhores desempenhos, em termos de volumes finais produzidos de metano.

Observou-se também que as composições com as maiores taxas de produção de metano foram aquelas que tiveram as menores durações de operação. Os tempos de fase *lag* dos reatores mostram que houve uma rápida adaptação da cultura microbiana às condições experimentais, com tempos variando entre 7,559 h e 13,906 h.

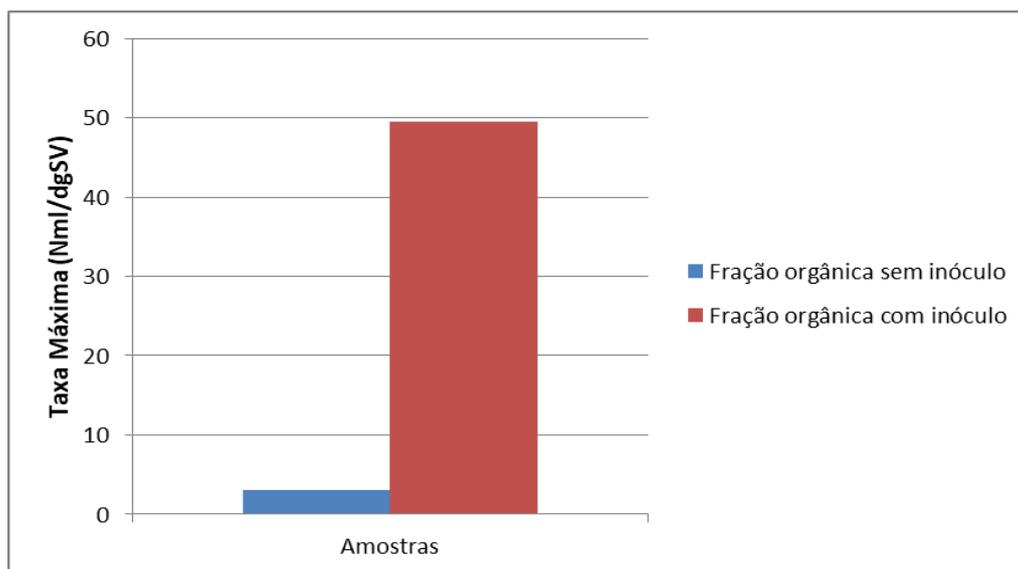
6.3.4 Parâmetros cinéticos k e L₀

Para determinação do potencial de geração de gás metano (L₀) as constantes específicas do modelo de Gompertz modificado foram determinadas pela divisão das constantes dispostas na Tabela 33 pelo teor de sólidos totais voláteis presentes em cada amostra. Esses valores estão apresentados. O potencial de CH₄ da fração orgânica inoculada foi determinado após a subtração da geração de metano do inóculo expressos na Tabela 34 e na Figura 67 e Figura 68. A partir dos dados obtidos, foi determinada a constante cinética de decaimento “k” da amostra da interação fração orgânica + lodo (Tabela 35), pois, independente dos valores obtidos pelas amostras individuais, o estudo irá analisar a geração de metano da fração orgânica que foi potencializada pelo inóculo.

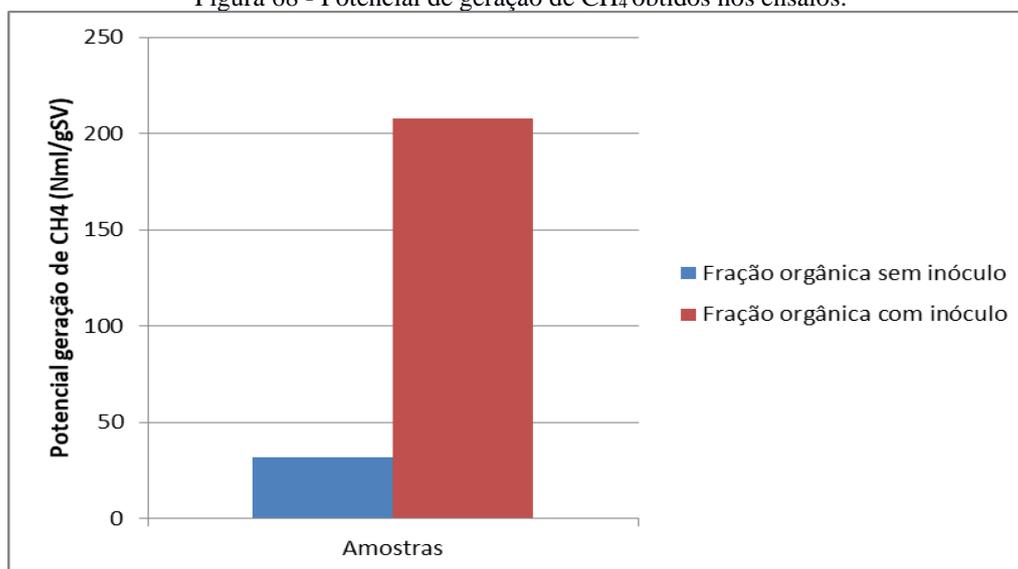
Tabela 34 - Potencial de geração de CH₄ e taxa máxima de CH₄

Amostra	Potencial de Geração CH ₄ (mL.g ⁻¹ SV ⁻¹)	Taxa específica máxima de produção de metano (mL.d ⁻¹ .g ⁻¹ SV ⁻¹)
Fração orgânica (não inoculada)	32,01	3,08
Inóculo (reator 4)	53,39	4,60
Fração orgânica (inoculada)	207,80	49,54

Fonte: Elaboração própria.

Figura 67 - Taxa máxima de CH₄ obtida nos ensaios

Fonte: Elaboração própria.

Figura 68 - Potencial de geração de CH₄ obtidos nos ensaios.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 35 - Constante cinética de decaimento k.

Amostra	k (dia⁻¹)
Lodo	0,017
Fração orgânica	0,06

Fonte: Elaboração própria.

De forma semelhante ao que foi observado anteriormente, o uso de inóculo potencializou na geração de gás metano. O seu uso elevou em 6,5 vezes o potencial de produção de metano, e em cerca de 16 vezes, o valor da taxa específica de produção máxima de metano, sendo o potencial de CH₄ de 32,01 NmLCH₄/gSV e potencial específica máxima de 3,08 NmLCH₄/d.gSV para a amostra sem a presença de inóculo e um potencial de geração de metano de 207,80 NmLCH₄/gSV e taxa de produção específica máxima de metano de 49,54 NmLCH₄/d.gSV para a amostra inoculada.

Esta sinergia é encontrada em alguns estudos como o de Lucena (2016), que apresentou resultados em que o uso de lodo como inóculo proporcionou um aumento de mais de 100% na geração acumulado de gás metano em relação ao resíduo sem inóculo. Alves (2008) apresentou resultados com aumento de 180% de potencial de geração de metano para a fração orgânica com inóculo em relação à amostra sem uso de inóculo. De Souza et. al. (2020), verificaram que a triplicata com uma maior quantidade de inóculo apresentou 3,4 vezes maior potencial de metano quando comparada com a triplicata com menor quantidade de inóculo. Deste modo, depreende-se que a quantidade de inóculo possui um papel fundamental na geração de biogás e gás metano. De acordo com Magalhães (2018) a co-digestão anaeróbia com lodo de esgoto deverá potencializar em média 3 a 5 vezes a geração de gás metano dos resíduos alimentares.

De acordo com Alves (2008) a análise do lodo associado aos resíduos é de fundamental importância para o entendimento de uma co-disposição de lodos e RSU, pois os lodos apresentam características que influenciam em aspectos como geração de biogás, metano, lixiviado, odores e estabilidade de um aterro.

Os valores encontrados, para o estudo com inóculo, da taxa específica máxima de metano, 49,54 NmLCH₄/d.gSV, estão dentro de encontradas na literatura. Lima (2016), encontrou valores para a taxa de produção máxima de metano com uma variação entre 43 e 486 NmLCH₄/dgSV, com valor médio 278 ±146 NmLCH₄/dgSV. Firmo (2013) obteve uma taxa máxima de geração de gás metano dos resíduos de comida de 18,01 NmLCH₄/dgSV.

O potencial de geração de gás metano, da fração orgânica potencializada com inóculo, foi de 207,80 NmLCH₄/gSV, dentro de valores reportados na literatura para fração orgânica recém gerada. Cabbai et al. (2013) caracterizaram diferentes tipos de fontes de frações orgânicas de resíduos sólidos urbanos, obtendo valores que iam desde 99,08 até 675,22 NmLCH₄/gSV. Além disso, Cabbai et al. (2013) também apresentaram valores de outros estudos em que houve uma variação de 186 e 570 NmLCH₄/gSV. Li et al. (2013), apresentou valores de potencial de produção específica de metano para fração orgânica que variavam de 214 e 725 NmLCH₄/gSV. Em um dos resultados obtidos por Firmo (2013), houve potencial de geração de CH₄ de 204,68 NmLCH₄/gSV. Stefanutti et al. (2019) testaram várias relações de inóculo/substrato e encontrou valores de produção específica de metano que iam de 420,33 Nml/gSV com uma relação de 1:1 e decaia para 99,01 Nml/gSV em uma relação de 1:4. Oliveira (2018) apresentou estudo de metanização de resíduos orgânicos e os valores do potencial de CH₄ variavam de 47,7 a 412,5 214 e 725 NmLCH₄/gSV.

6.4 MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA GERAÇÃO DE METANO

Dois modelos matemáticos de primeira ordem foram aplicados para estimar a geração de gás metano no aterro sanitário do Agreste Alagoano, Modelo LandGEM e Modelo IPCC. As estimativas foram realizadas através de dois cenários, o primeiro com dados padrões de cada modelo e o segundo com dados obtidos através do ensaio laboratorial da matéria orgânica, exceto os dados da composição gravimétrica que para ambos, foram utilizados os dados de campo, apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Componentes RSU para IPCC e LandGEM

COMPONENTES RSU - IPCC	(%)
Matéria Orgânica	47,24
Papel/Papelão	8,59
Madeira	0,20
Têxtil	3,68
Resíduos Sanitários	11,06
Resíduos Inertes (outros)	29,23
TOTAL	100,00

Fonte: Dados da pesquisa.

6.4.1 Cenário 1

A padrões de entrada do programa.

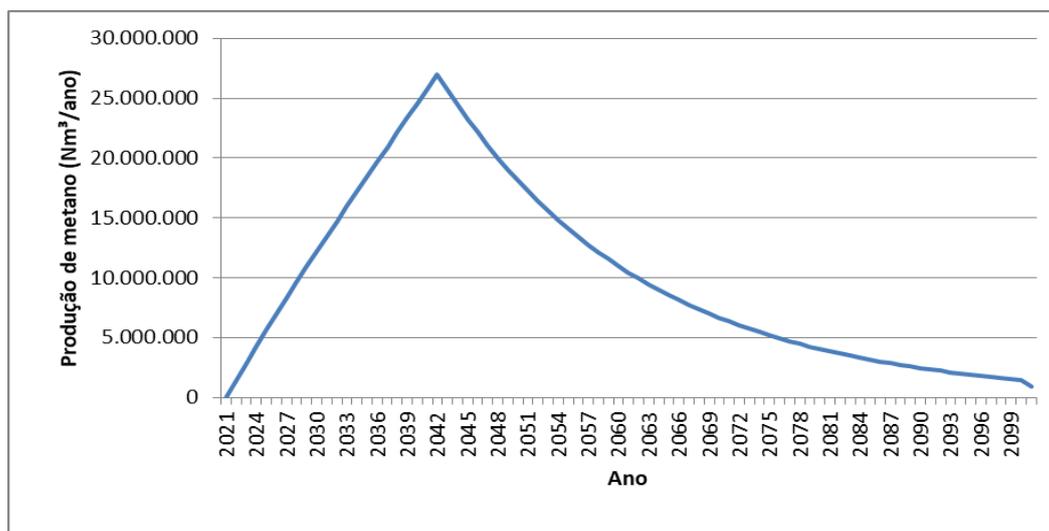
Tabela 37, Figura 69 e Figura 70 apresentam a produção anual de gás metano no aterro previsto pelo LandGEM com os parâmetros padrões de entrada do programa.

Tabela 37 - Produção de gás metano pelo modelo Landgem – Cenário 1

ANO	PRODUÇÃO CH ₄ (Nm ³ /ano)	ANO	PRODUÇÃO CH ₄ (Nm ³ /ano)
2021	0	2032	1,475 x 10 ⁷
2022	1,438 x 10 ⁶	2033	1,599. x 10 ⁷
2023	2,859 x 10 ⁶	2034	1,723. x 10 ⁷
2024	4,246 x 10 ⁶	2035	1,847 x 10 ⁷
2025	5,619 x 10 ⁶	2036	1,969 x 10 ⁷
2026	6,981 x 10 ⁶	2037	2,092 x 10 ⁷
2027	8,312 x 10 ⁶	2038	2,212 x 10 ⁷
2028	9,632 x 10 ⁶	2039	2,336 x 10 ⁷
2029	1,093 x 10 ⁷	2040	2,458 x 10 ⁷
2030	1,222 x 10 ⁷	2041	2,580 x 10 ⁷
2031	1,348 x 10 ⁷	2042	2,702 x 10 ⁷

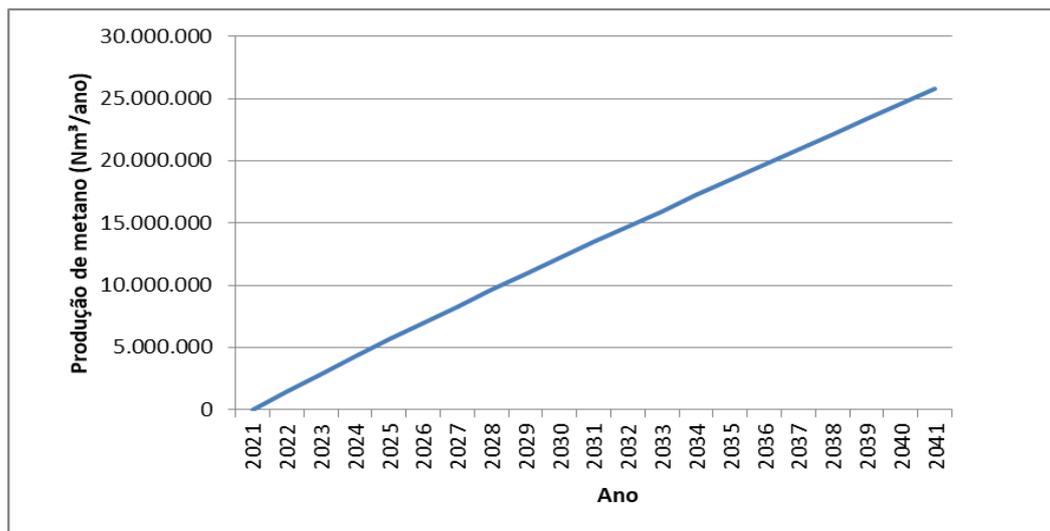
Fonte: Elaboração própria.

Figura 69 - Estimativa de geração de gás metano utilizando modelo Landgem – Cenário 1.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 70 - Geração de gás metano durante a vida útil do aterro utilizando modelo Landgem – Cenário 1.



Fonte: Elaboração própria.

O programa LandGEM permitiu avaliar o volume de gás metano obtendo-se um valor médio, durante um horizonte de 20 anos no aterro entre os anos de 2021 e 2041, de 13.930.352 Nm³/ano com produção máxima de CH₄ no ano de 2042, um ano após o horizonte estimulado de recebimento de resíduos, de 27.015.535Nm³/ano. O acumulado de metano foi de 278.607.043Nm³/ano.

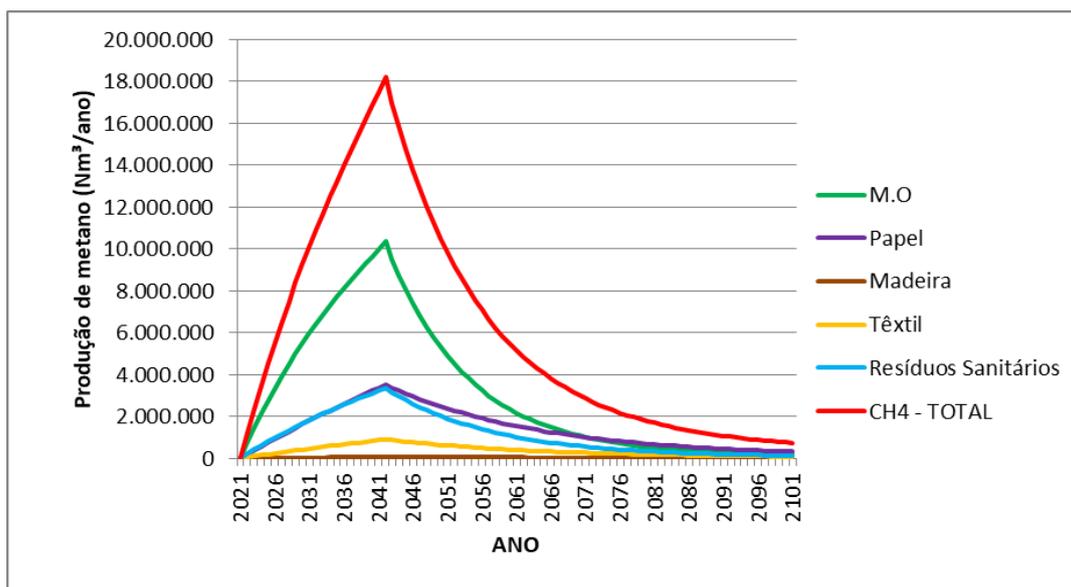
Na Tabela 38, Figura 71 e Figura 72, é possível analisar a geração de gás metano no aterro através do Modelo IPCC com aplicação de valores padrões para a região climática do aterro.

Tabela 38 - Produção de gás metano pelo modelo IPCC – Cenário 1

Ano	M.O	Papel/Papelão	Madeira	Têxtil	R.Sanitários	Total CH4
	m ³					
2021	0	0	0	0	0	0
2022	753.010	194.047	2.725	49.878	214.396	1.214.057
2023	1.463.417	384.389	5.451	98.805	420.641	2.372.704
2024	2.134.149	571.050	8.175	146.784	619.092	3.479.250
2025	2.768.826	754.290	10.900	193.885	810.351	4.538.251
2026	3.371.139	934.455	13.627	240.195	995.083	5.554.499
2027	3.942.694	1.111.414	16.353	285.681	1.173.407	6.529.550
2028	4.486.091	1.285.332	19.079	330.386	1.345.753	7.466.640
2029	5.005.303	1.456.776	21.810	374.454	1.512.973	8.371.317
2030	5.501.784	1.625.721	24.544	417.880	1.675.244	9.245.175
2031	5.977.601	1.792.333	27.283	460.707	1.832.939	10.090.862
2032	6.434.646	1.956.767	30.026	502.973	1.986.404	10.910.816
2033	6.874.667	2.119.177	32.775	544.720	2.135.968	11.707.307
2034	7.299.263	2.279.705	35.530	585.982	2.281.937	12.482.417
2035	7.709.903	2.438.489	38.291	626.797	2.424.597	13.238.077
2036	8.107.936	2.595.661	41.060	667.197	2.564.217	13.976.070
2037	8.494.602	2.751.346	43.837	707.214	2.701.049	14.698.047
2038	8.871.049	2.905.666	46.622	746.881	2.835.331	15.405.550
2039	9.248.893	3.061.461	49.454	786.927	2.970.294	16.117.029
2040	9.617.763	3.216.022	52.296	826.656	3.102.975	16.815.713
2041	9.978.601	3.369.458	55.147	866.096	3.233.578	17.502.881
2042	10.343.180	3.524.684	58.048	905.996	3.365.398	18.197.305

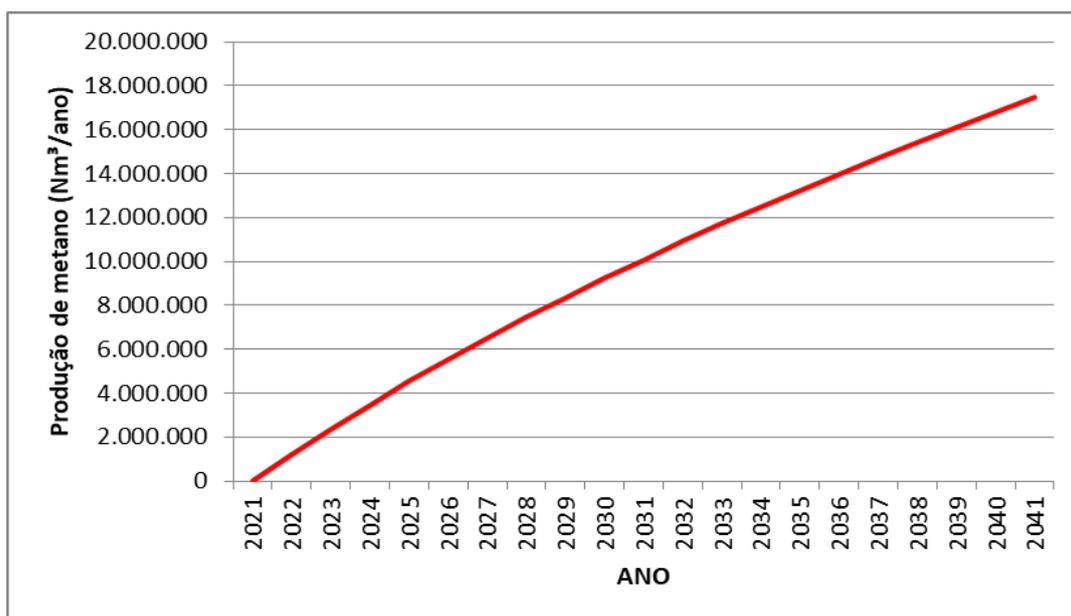
Fonte: Elaboração própria.

Figura 71 - Estimativa de geração de gás metano utilizando modelo IPCC – Cenário 1.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 72 - Geração de gás metano durante a vida útil do aterro utilizando modelo IPCC – Cenário 1.

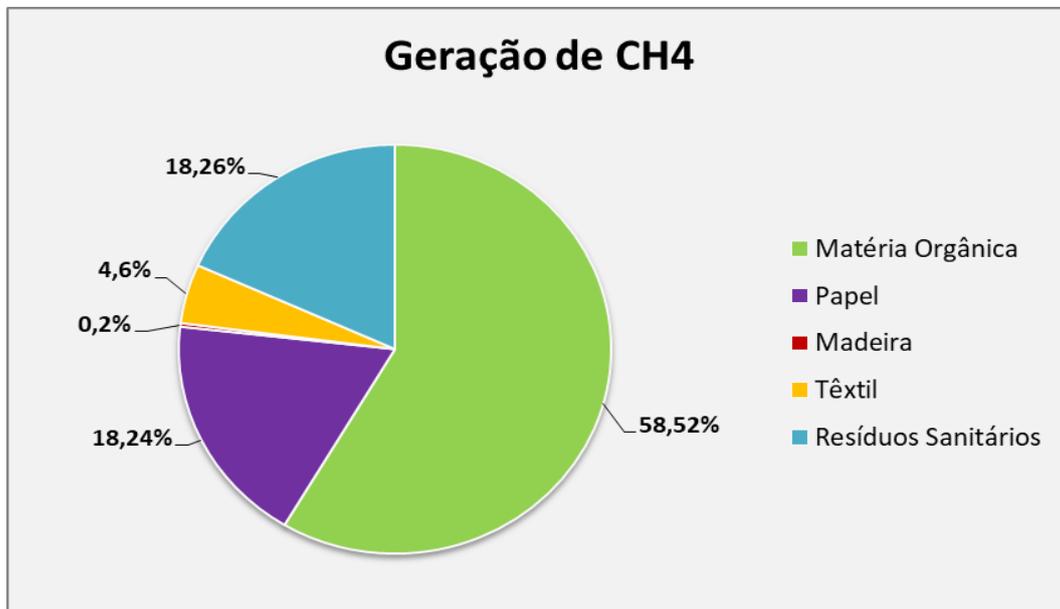


Fonte: Elaboração própria.

A partir da aplicação do modelo IPCC, obteve-se média de 10.085.810,65Nm³/ano com pico máximo de geração de CH₄ no ano de 2042, um ano após o fim do horizonte de previsão de recebimento dos resíduos, com total de 18.197.305Nm³/ano, e um total acumulado de metano nos 20 anos de 201.716.213Nm³/ano.

Diferentemente do LandGEM, o modelo IPCC considera as diferenças na composição do conteúdo das massas dos resíduos no aterro. A Figura 73 apresenta a contribuição de cada componente dos RSU na geração de gás metano no horizonte estudado no aterro.

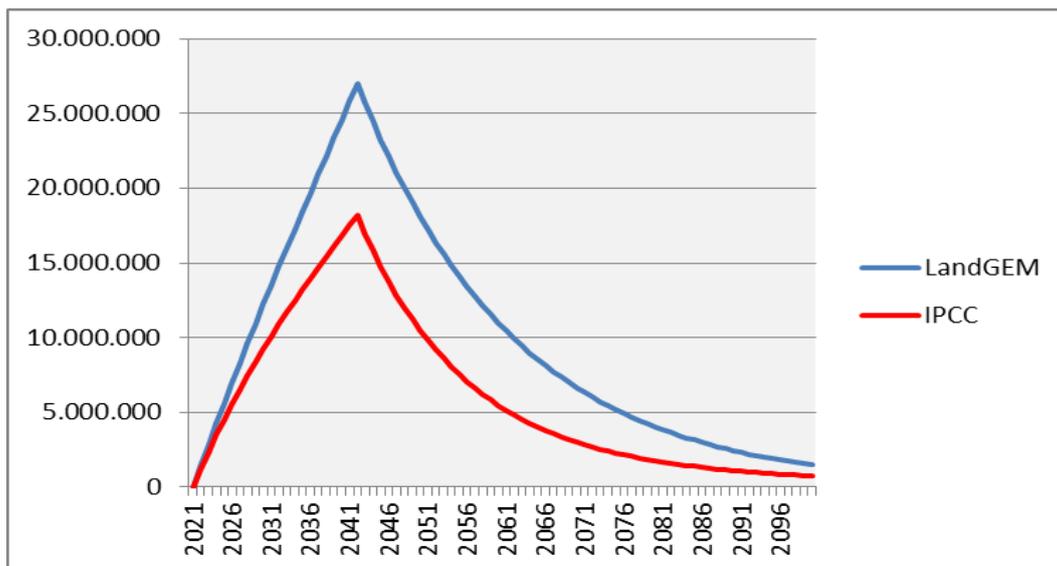
Figura 73 - Contribuição de CH₄ de cada componente do resíduo – Cenário 1.



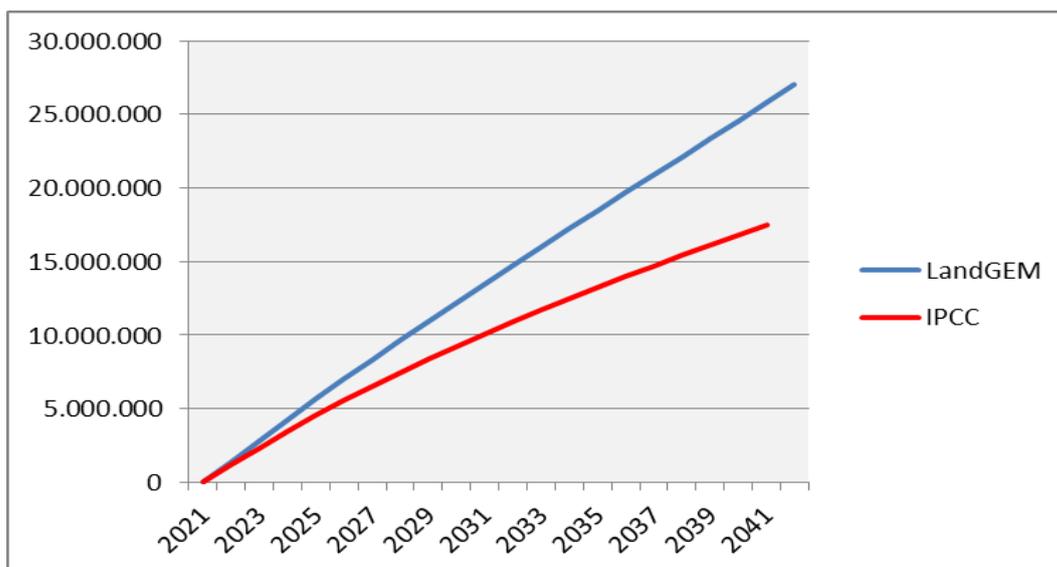
Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que a maior contribuição vem da matéria orgânica tendo representado aproximadamente 60% da geração total de metano, seguida por resíduos sanitários, com 18,26% e papel/papelão com 18,24%. Os resíduos sanitários, composto em sua maioria por fraldas, papel higiênico e guardanapos, são ricos em matéria orgânica, por isso apresentam uma contribuição significativa no modelo devido a degradação dessa MO. As menores contribuições de CH₄, gerado na vida útil do aterro, são da madeira, com 0,2% e dos materiais têxteis com total de 4,6% do metano total gerado. De acordo com Fallahizadeh et al (2019), a produção de metano de têxteis e madeiras parecem ser quase as mesmas, indicando que suas mudanças também não afetam significativamente. Portanto, espera-se que os valores gerados por esses materiais sejam pequenos em comparação com outros materiais descartados em aterros sanitários, o que leva a uma contribuição relativamente pequena para a produção de metano.

A Figura 74 e a Figura 75 apresentam uma comparação entre os modelos LadGem e IPCC para este cenário analisado.

Figura 74 - Comparação na estimativa de CH₄ entre os modelos Landgem e IPCC – Cenário 1

Fonte: Elaboração própria.

Figura 75 - Comparação na estimativa de CH₄ durante o horizonte estudado – Cenário 1

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados de ambos os modelos matemáticos demonstraram uma quantidade significativa de produção de gás metano, no entanto o modelo LandGEM apresenta uma quantidade média de 38% superior na produção de CH₄, quando comparado ao modelo IPCC. Essa diferença nos resultados pode ser explicada pelas diferentes variáveis que são consideradas em cada modelo.

Os modelos apresentaram um aumento progressivo na quantidade de metano emitido de ano para ano, apresentando gráficos com comportamento crescente durante o período em que o aterro receberá os resíduos. O pico máximo na geração de CH₄ ocorre um ano após

os 20 anos estudados, em 2042, que é quando a quantidade máxima de resíduos estará disposta no aterro, e em seguida as curvas são regidas pela constante de decaimento (k) referente à degradação dos resíduos para ambos os modelos.

Firmo (2013) realizou modelagem com estes programas com os valores padrões. O LandGEM se mostrou bastante otimista, enquanto que a ferramenta IPCC chegou mais próximo da realidade da geração de gás metano coletado nas tubulações do aterro em estudo.

Piñas et al. (2016) realizou uma comparação entre dois modelos matemáticos, sendo o LandGem o que apresentou uma geração maior de gás metano durante a vida útil do aterro estudado.

Bianek et al. (2017) também realizou uma comparação entre os modelos e verificou que o modelo LandGEM apresenta como uma desvantagem o fato de não considerar as diferentes composições do conteúdo dos resíduos, mas nos casos em que não existirem informações suficientes para servirem de insumo para outros modelos a sua aplicação é vantajosa.

Fallahizadesh et. Al (2019) verificou que de acordo com os resultados, o modelo LandGem apresentou uma elevada produção generosa de gás metano durante os anos de estudo no aterro. Os resultados também mostraram que a taxa máxima de produção de metano ocorreu durante os anos seguintes, após o encerramento do aterro e, em seguida, reduziu com uma inclinação suave e que o método e os resultados de sua pesquisa podem ser utilizados para o projeto e execução de sistemas de coleta de gás metano e também, controle da emissão de gases de efeito estufa em aterros sanitários.

6.4.2 Cenário 2

Para a configuração do cenário 2 foi necessário determinar o carbono orgânico degradável (COD) da matéria orgânica (M.O) estudada em laboratório.

Tendo o potencial de metano da matéria orgânica que chega ao aterro igual a $207,80 \text{Nm}^3_{\text{CH}_4}/\text{Ton}_{\text{RSU}}$, o que resulta em:

$$L_{0\text{M.O}} = 0,148 \text{ Gg}_{\text{CH}_4}/\text{G}_{\text{grSU}},$$

Aplicando na Equação 10 chegou-se a um valor de $COD_{M.O} = 0,25$.

Para o cenário 2 do modelo LandGEM foi determinado o valor médio do potencial de geração de metano com base na composição gravimétrica dos resíduos e do valor do COD médio dos resíduos.

O valor do COD médio dos resíduos foi determinado com base na Equação 11, em que foi utilizado a gravimetria realizado em campo e substituído o valor do COD da matéria orgânica pelo valor encontrado em dados de laboratório. Os demais valores de COD dos outros resíduos permaneceram sendo os valores padrões recomendados pelo IPCC (2006). Logo, chegou-se a um valor médio do COD = 16,778.

A partir do carbono orgânico degradável de 16,778% determinou-se o potencial de geração de metano, que resultou em:

$$L_0 = 0,08926 G_{gCH_4}/G_{gRSU} \rightarrow L_0 = 131,53 \text{ Nm}^3_{CH_4}/\text{Ton}_{RSU}.$$

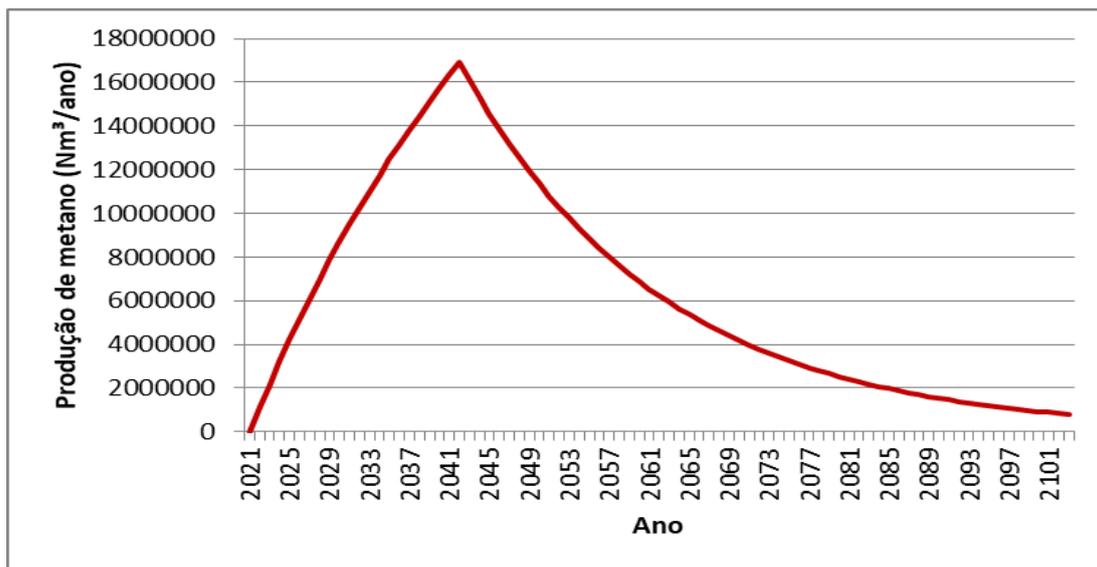
Com base no novo potencial de geração de metano, e considerando a constante de decaimento padrão do modelo para a região, foi possível realizar uma nova estimativa com o programa LandGEM, como podem ser vistos na Tabela 39, Figura 76, Figura 77.

Tabela 39 - Produção de gás metano pelo modelo Landgem – Cenário 2

ANO	PRODUÇÃO CH ₄ (Nm ³ /ano)	ANO	PRODUÇÃO CH ₄ (Nm ³ /ano)
2021	0	2032	10275746
2022	1112376	2033	11030690
2023	2184476	2034	11761781
2024	3217144	2035	12470179
2025	4212556	2036	13156990
2026	5173284	2037	13823263
2027	6099264	2038	14470011
2028	6992045	2039	15111117
2029	7855262	2040	15733914
2030	8689350	2041	16339291
2031	9495730	2042	16941047

Fonte: Elaboração própria.

Figura 76 - Estimativa de geração de gás metano utilizando modelo Landgem – Cenário 2



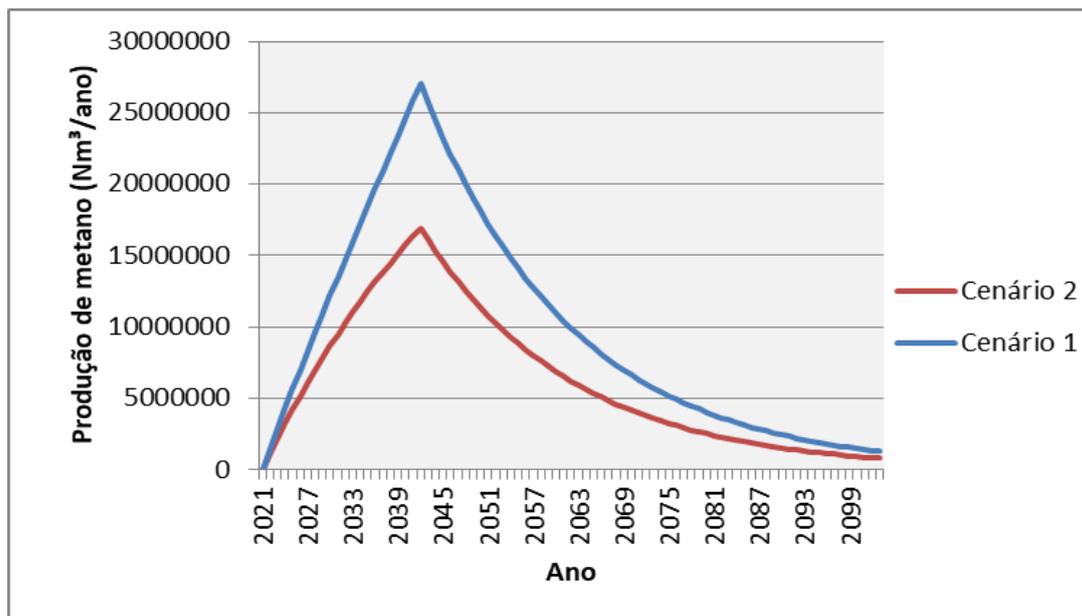
Fonte: Elaboração própria.

Figura 77 - Geração de gás metano durante o horizonte estudado no aterro - Cenário 2



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 78 apresenta uma comparação entre as estimativas nos dois cenários, onde se observa que, com o valor do novo potencial de geração de gás metano obtido houve uma redução 32% na produção de metano durante a projeção de 20 anos no aterro e de 47,25% na média em comparação com o cenário anterior.

Figura 78 - Comparação na estimativa de CH₄ entre os cenários 1 e 2 através do Modelo Landgem

Fonte: Elaboração própria.

O total médio, em 20 anos, de CH₄ foi de 9.460.223 Nm³/ano com o pico máximo um ano após o fim da projeção de 16.339.291,29 Nm³/ano. O total acumulado passou de 278.607.043 Nm³/ano para 189.204.469 Nm³/ano na nova configuração. Essa redução ocorreu devido à diminuição no potencial de geração de gás metano, determinado com dados experimentais.

Para a modelagem no IPCC, foi substituído o carbono orgânico degradável da matéria orgânica pelo novo valor obtido, os parâmetros dos demais componentes dos resíduos permaneceram os valores padrões do programa. Na Tabela 40, Figura 79 e Figura 80, é possível verificar a estimativa da geração de gás metano na nova configuração.

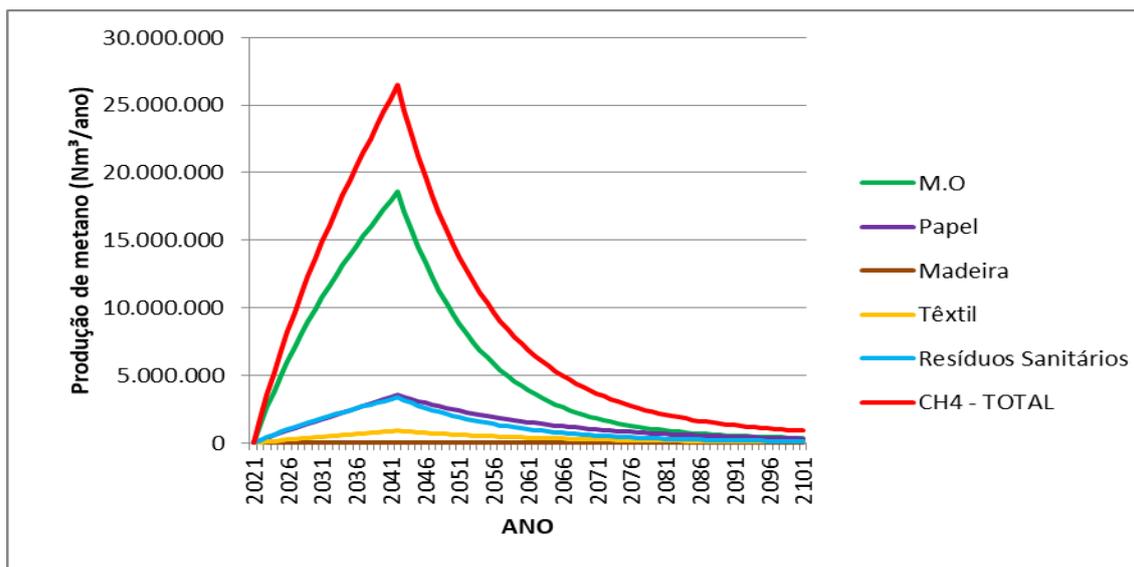
Tabela 40: Produção de gás metano pelo modelo IPCC – Cenário 2

ANO	PRODUÇÃO CH ₄ (Nm ³ /ano)	ANO	PRODUÇÃO CH ₄ (Nm ³ /ano)
2021	0	2032	11.582.362
2022	1.355.417	2033	12.374.401
2023	2.634.151	2034	13.138.673
2024	3.841.468	2035	13.877.825
2025	4.983.886	2036	14.594.284
2026	6.068.049	2037	15.290.283
2027	7.096.850	2038	15.967.889
2028	8.074.964	2039	16.648.007
2029	9.009.546	2040	17.311.974
2030	9.903.212	2041	17.961.482
2031	10.759.682	2042	18.617.723

Fonte: Elaboração própria.

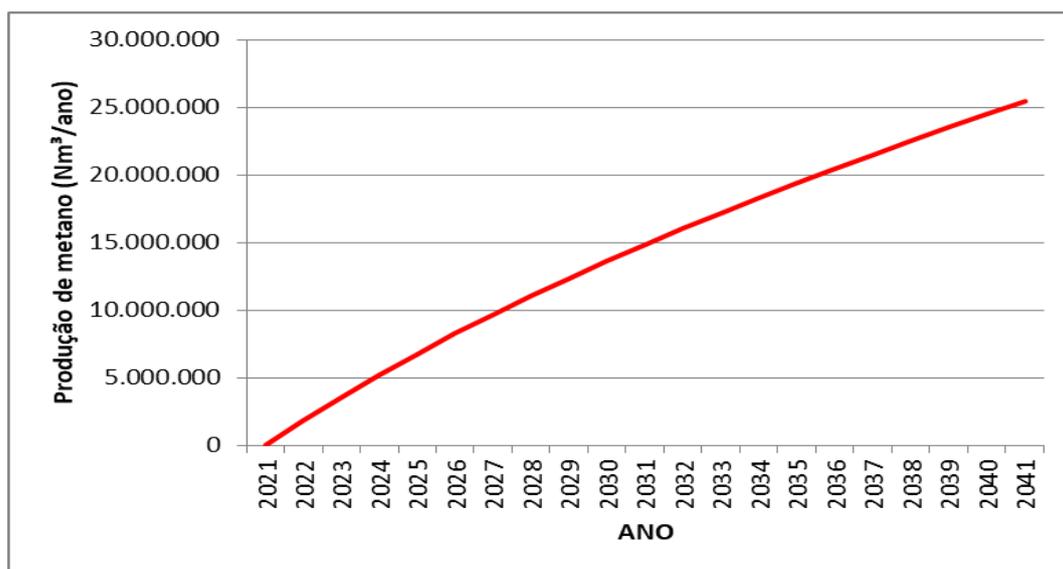
Figura 79: Estimativa de geração de gás metano utilizando modelo IPCC – Cenário 2.

Figura 80 - Estimativa de geração de gás metano utilizando modelo IPCC – Cenário 2.



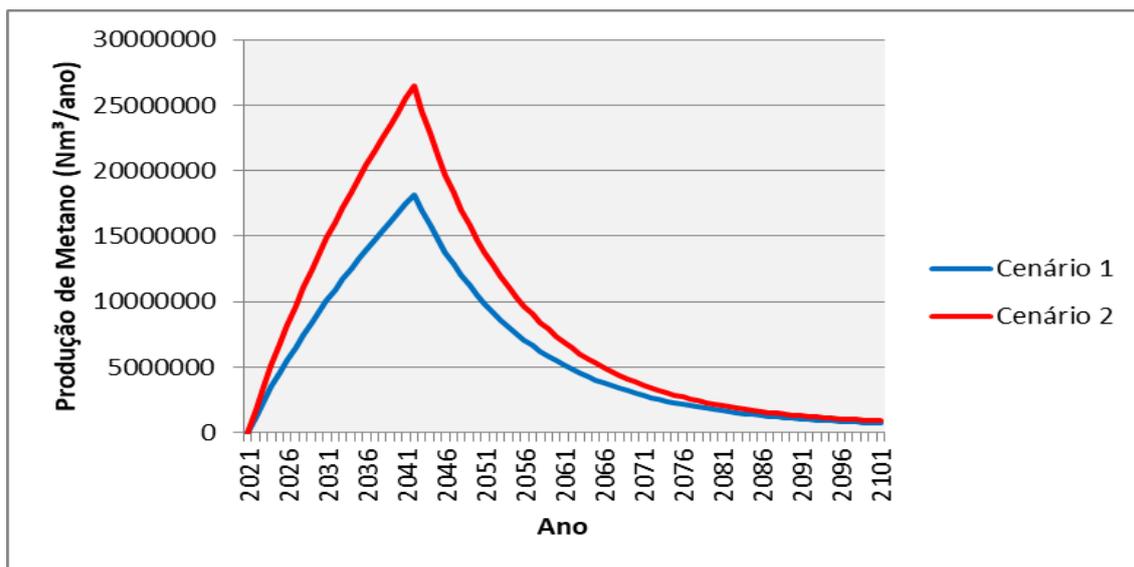
Fonte: Elaboração própria.

Figura 81 - Geração de gás metano durante o horizonte estudado do aterro utilizando – Cenário 2.



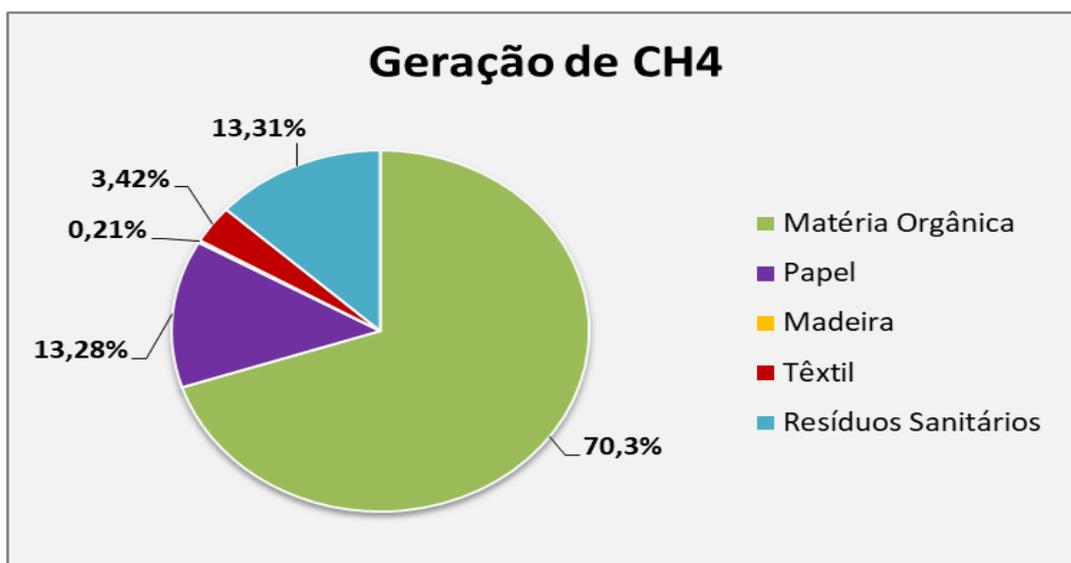
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 81 apresenta uma comparação entre os dois cenários. Verifica-se que pelo modelo IPCC houve um aumento significativo na produção de metano, alcançando valor máximo, em 2042, de 26.471.848,79 Nm³/ano, média de 14.807.464Nm³/ano e um acumulado na projeção de 20 anos de 296.149.281,2Nm³/ano, representando aumento de 46% em relação ao cenário anterior.

Figura 82 - Comparação na estimativa de geração de CH₄ entre os cenários 1 e 2 do modelo IPCC

Fonte: Elaboração própria.

Essa diferença na geração de CH₄, nos resultados dos dois cenários, é explicada pelos diferentes valores de COD utilizada no componente da matéria orgânica, já que no cenário 1 foi adotado o valor padrão de 0,15 e no cenário 2, com dados de laboratório, o valor passou a ser 0,27, o que representa um valor de aproximadamente 80% maior. A Figura 83 apresenta os percentuais de contribuição na geração de metano de cada componente dos RSU na nova configuração.

Figura 83 - Contribuição de CH₄ de cada componente do resíduo – Cenário 2

Fonte: Elaboração própria.

No novo cenário houve um aumento de 60% para 71% na composição de metano pela matéria orgânica, ocasionado devido ao aumento no COD deste componente, que é o

principal material do RSU na contribuição da quantidade de CH₄. Em seguida aparecem os resíduos sanitários com 13,28%, papel com 13,31% e em menores quantidades de geração de CH₄, os resíduos têxteis com 3,42% e os resíduos de madeira com 0,21%.

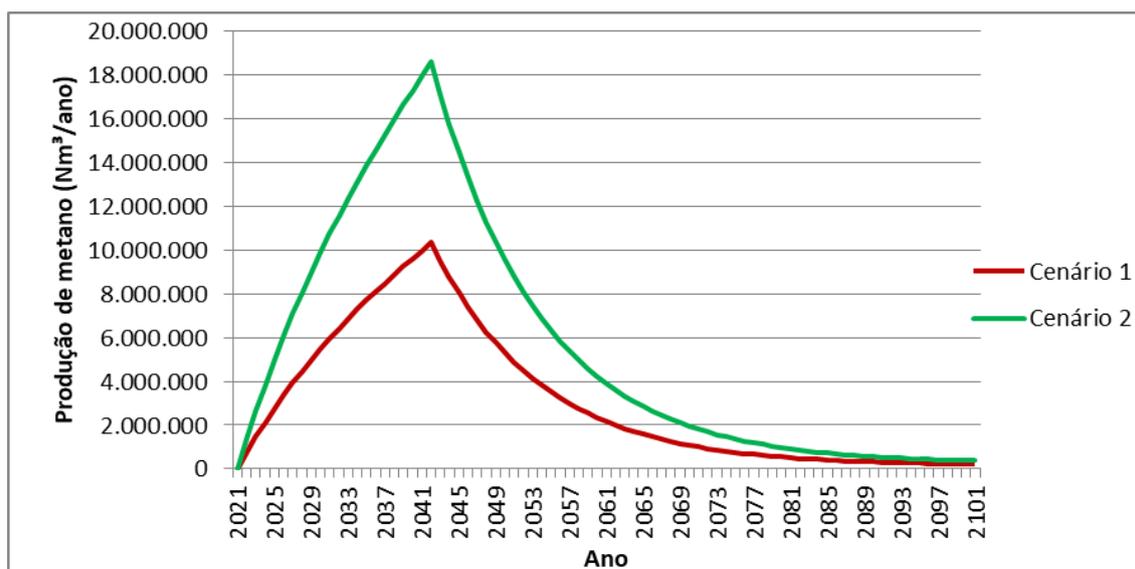
A Tabela 41 e a Figura 83 apresentam uma comparação na estimativa de gás metano da matéria orgânica nos dois cenários, considerando valor padrão para o COD no cenário 1 e valor laboratorial para o COD no cenário 2.

Tabela 41 - Produção de gás metano pela matéria orgânica nos dois cenários

ANO	PRODUÇÃO METANO (Nm ³ /ano)		ANO	PRODUÇÃO METANO (Nm ³ /ano)	
	Cenário 1	Cenário 2		Cenário 1	Cenário 2
2021	0	0	2032	6.434.646	11.582.362
2022	753.010	1.355.417	2033	6.874.667	12.374.401
2023	1.463.417	2.634.151	2034	7.299.263	13.138.673
2024	2.134.149	3.841.468	2035	7.709.903	13.877.825
2025	2.768.826	4.983.886	2036	8.107.936	14.594.284
2026	3.371.139	6.068.049	2037	8.494.602	15.290.283
2027	3.942.694	7.096.850	2038	8.871.049	15.967.889
2028	4.486.091	8.074.964	2039	9.248.893	16.648.007
2029	5.005.303	9.009.546	2040	9.617.763	17.311.974
2030	5.501.784	9.903.212	2041	9.978.601	17.961.482
2031	5.977.601	10.759.682	2042	10.343.180	18.617.723

Fonte: Elaboração própria.

Figura 84 - Comparação na estimativa de geração de CH₄ da matéria orgânica entre os cenários 1 e 2

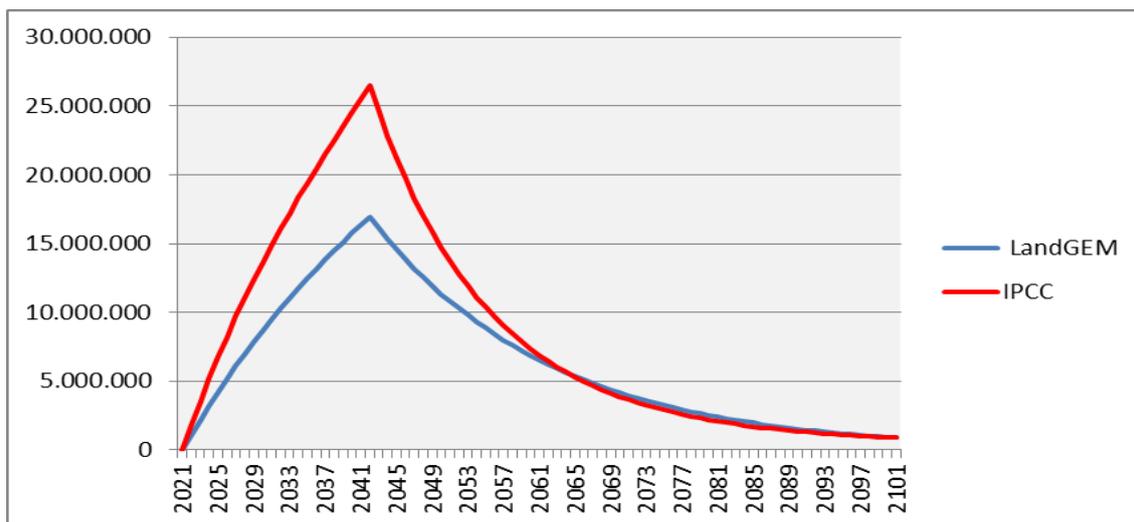


Fonte: Elaboração própria.

Quando considerado o valor de COD padrão do programa, a matéria orgânica apresentou uma produção média de metano, durante 20 anos no aterro, 5.902.067Nm³/ano,

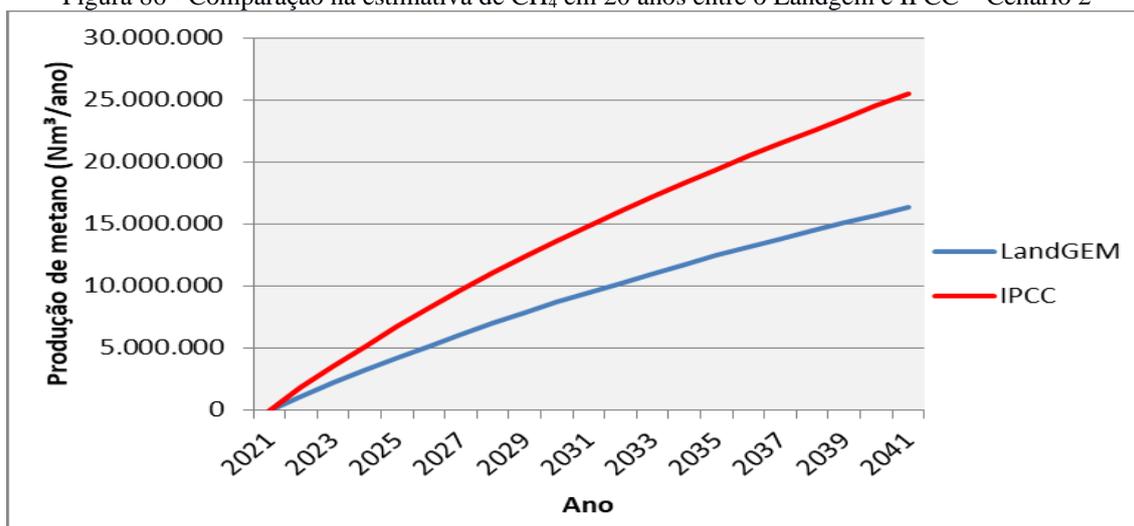
acumulada de 118.041.336 Nm³/ano e valor máximo um ano após o encerramento em 2042, de 10.343.180Nm³/ano. Quando considerado o novo valor do COD para o cenário 2, o valor em 20 anos de geração de CH₄ passou a ter valor médio de 10.623.720,2Nm³/ano, máximo de 18.617.723Nm³/ano e acumulado de 20 anos de 212.474.404 Nm³/ano. O aumento na geração de CH₄ foi de 80% entre os cenários, o que mostra que qualquer aumento na quantidade de carbono orgânico degradável resultará em uma maior quantidade na geração de gás metano. As Figura 85 e Figura 86 apresentam um comparativo entre os modelos LandGEM e IPCC na configuração do novo cenário.

Figura 85 - Comparação na estimativa de CH₄ entre os modelos Landgem e IPCC – Cenário 2



Fonte: Elaboração própria.

Figura 86 - Comparação na estimativa de CH₄ em 20 anos entre o Landgem e IPCC – Cenário 2



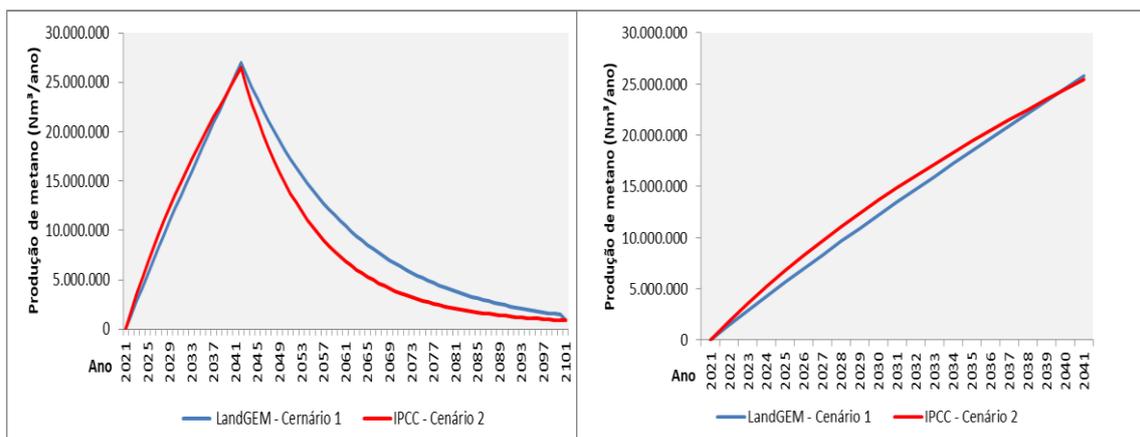
Fonte: Elaboração própria.

Nesse novo cenário, o IPCC apresenta uma maior geração de metano quando comparado com o LandGEM, em média, 56% a mais no acumulado de CH₄, durante 20 anos, e ambos os modelos apresentam pico máximo em 2042. Já quando observado uma projeção após

a vida útil, observa-se nos gráficos que o modelo IPCC apresenta um decaimento maior na produção de CH₄, apresentando valores anuais menores ao do modelo LandGEM a partir do ano de 2061 e se mantendo inferior até o fim da projeção, ano de 2100. Quando comparado o acumulado de metano durante a projeção total dos modelos, o modelo IPCC apresenta uma diferença de 32,66% a mais de produção acumulada de metano em relação ao LandGEM.

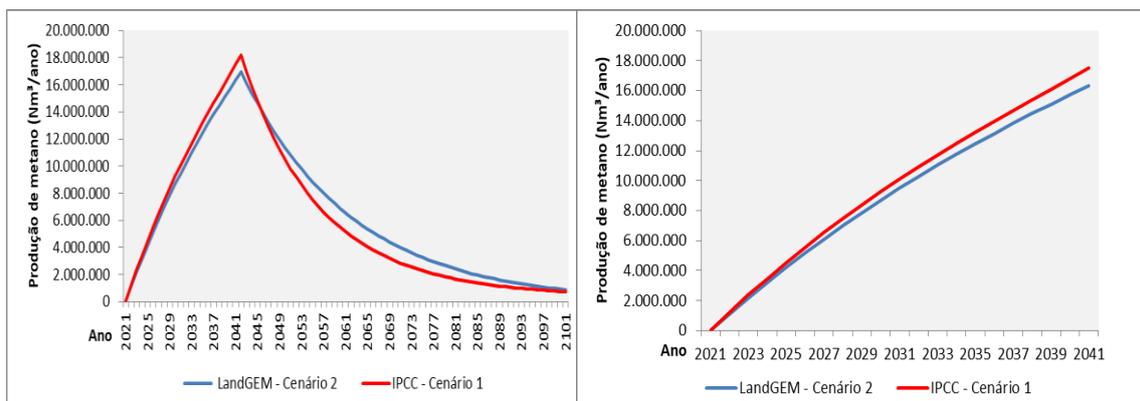
Entre os cenários mais otimistas tem-se os resultados obtidos no cenário 2 com o modelo IPCC, utilizando-se dados reais para matéria orgânica, e os resultados obtidos com dados hipotéticos do modelo LandGEM no cenário 1 (Figura 86). Já entre os cenários mais pessimistas tem-se o modelo IPCC com dados padrões do cenário 1 e o modelo LandGEM no cenário 2 com uso reais (Figura 87).

Figura 87 - Estimativa de CH₄ entre os cenários mais otimistas: Landgem (cenário 1) e IPCC (cenário 2)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 88 - Estimativa de CH₄ entre cenários mais pessimistas: Landgem (cenário 2) e IPCC (cenário 1)



Fonte: Elaboração própria.

Analisando os cenários mais otimistas, observa-se que o crescimento na geração de CH₄ entre os modelos são semelhantes, obtendo pico máximo no ano de 2042, sendo o modelo Landgem com o valor máximo 2% maior do que o modelo IPCC. Quando comparamos à

média e o acumulado dos 20 anos, tem-se a ferramenta IPCC apresentando 6,2% de CH₄ a mais em relação ao Landgem. A principal diferença é notada quando se encerra o horizonte de recebimento dos resíduos e a partir daí o modelo IPCC apresenta uma velocidade de decaimento na taxa de geração de metano maior, sendo assim o modelo Landgem, com dados hipotéticos, mais otimista na geração de CH₄.

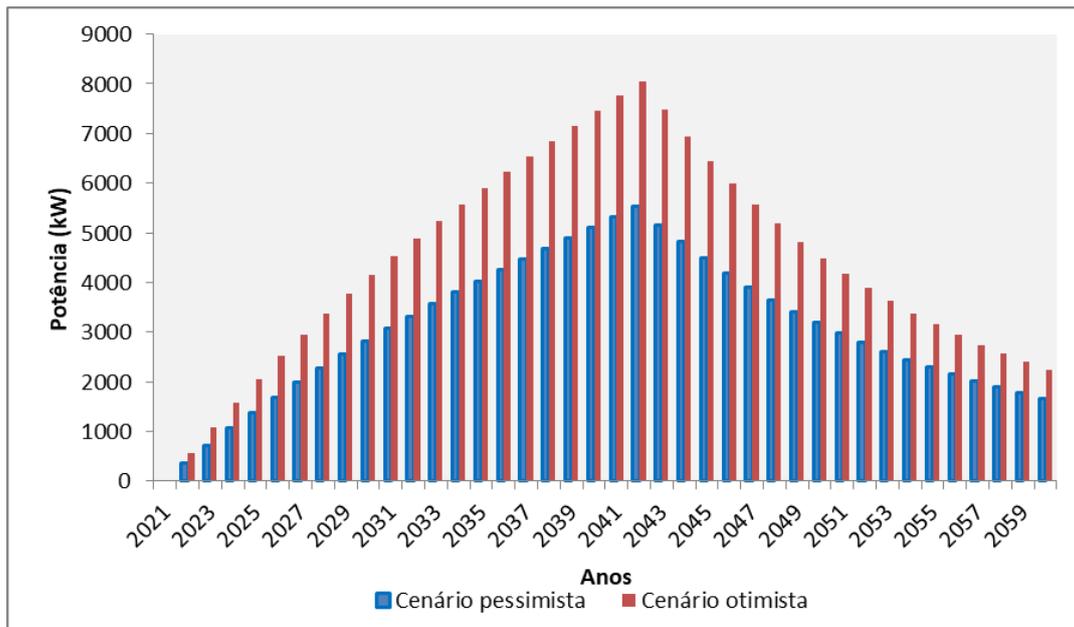
Quando se observa os cenários mais pessimistas, o IPCC apresenta um pico máximo 7% maior de CH₄ em relação ao Landgem e 6,6% a mais de metano ao longo dos 20 anos de projeção. Mas, quando considerado em longo prazo, após o recebimento de resíduos, o IPCC apresentou também um decaimento maior na geração de metano, fazendo assim com que o Landgem seja um cenário mais otimista no acumulado total.

Os dados obtidos nesta etapa da pesquisa servem para exemplificar como se realiza o procedimento através destas ferramentas (LandGEM e IPCC), não devendo ser utilizado para dimensionamentos futuros. O ideal seria a quantificação real nos dutos do aterro, para isso seria necessário apagar a queima do gás e realizar a medição e depois se fazer uma nova ignição. Assim, seria possível realizar ajustes nos softwares para verificar qual apresenta menor erro na estima e quantificação de gás metano. Isto não foi feito neste trabalho, ficando como uma sugestão para um trabalho futuro.

6.5 POTÊNCIA E ENERGIA DISPONÍVEL

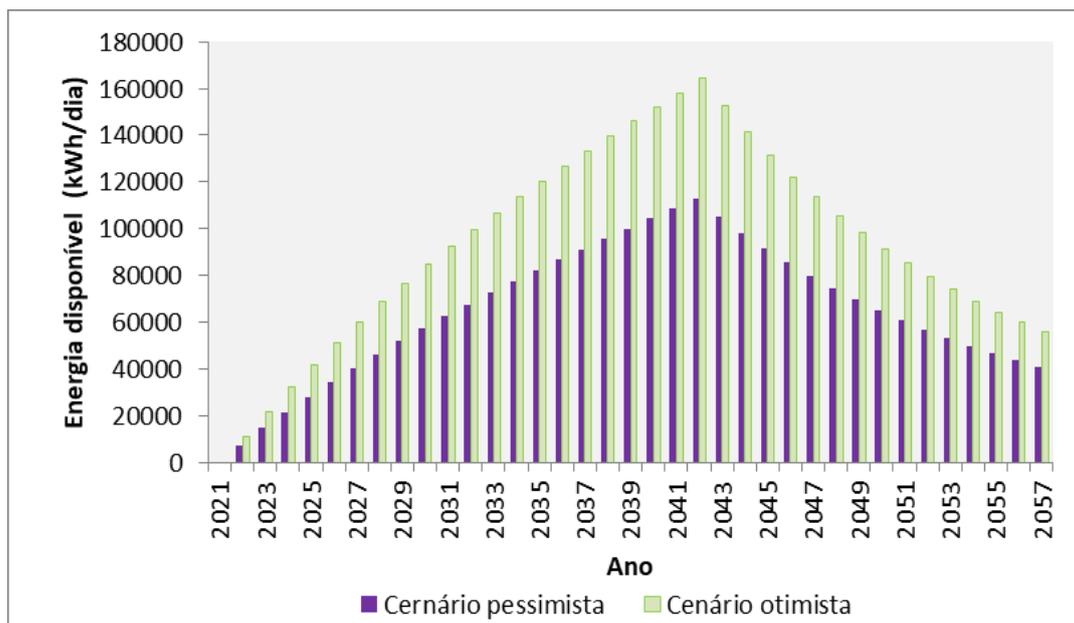
Em função da estimativa de geração de metano através da ferramenta IPCC para o cenário mais otimista e mais pessimista, ao longo dos anos, foi realizado o cálculo da potência (kW) e da geração de energia elétrica (kWh/dia) disponível no aterro sanitário, conforme Figura 88 e Figura 89.

Figura 89 - Potência gerada ao longo do tempo



Fonte: Elaboração própria.

Figura 90 - Energia disponível ao longo do tempo



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que a potência e a energia gerada são diretamente proporcionais à vazão de gás metano no aterro e decaem a partir do momento em que se encerra o horizonte de recebimento dos resíduos, regido pela constante de decaimento (k), referente à degradação da matéria orgânica no tempo.

A potência média observada no cenário mais otimista, para o horizonte de recebimento dos resíduos de 20 anos, foi de 4504,36 kW, com potência máxima de 8052,60kW no ano

de 2042. Para o cenário de geração de metano mais pessimista a potência média foi de 3068,05kW, potencia máxima de 5535,53kW, no ano de 2042. O cenário mais pessimista apresentou 45% menos de potência média em relação ao cenário otimista.

A geração média de energia, no horizonte de 20 anos, para o cenário mais otimista foi de 91.888,93kWh/dia, com máxima no ano de 2042 de 164.273,23kWh/dia. Para o cenário mais pessimista tem-se uma geração média de energia de 62.588,33kWh/dia, máxima também em 2042 de 108.615,56kWh/dia.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Conclusões

Neste item são apresentadas as principais conclusões finais, observadas nos resultados e análises deste trabalho.

a) **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos do Aterro**

O principal componente dos resíduos sólidos urbanos do Aterro Sanitário do Agreste Alagoano é matéria orgânica com 47,24% do total, estando perto da média nacional que é cerca de 51%. Por receber resíduos de vários municípios que apresentam renda per capita pequena, muitos menores do que a renda média de Alagoas, o índice de matéria orgânica tende a apresentar altos índices. Esse percentual representa um forte potencial para a compostagem e na ausência de formas apropriadas de tratamento podem implicar em impactos ao meio ambiente.

Os resíduos potencialmente recicláveis representam 32,26% do resíduo, com predominância de plásticos, principalmente os flexíveis (termoplásticos). O alto índice de plástico pode ser considerado preocupante, pois apesar desse material ser reciclável a contaminação dos plásticos com a matéria orgânica, areia ou óleo e a mistura de polímeros que não são quimicamente compatíveis prejudicam o processo de reciclagem. Na ausência de reciclagem os plásticos geram um alto custo para o meio ambiente, pois representam um forte agente poluidor já que estes são de difíceis decomposições. Os resíduos sem potencial de reciclagem e compostagem representaram 20,50% do montante com predominância de resíduos sanitários, terras e similares.

Os percentuais obtidos neste estudo podem permitir à gestão do aterro e municípios a planejar ações de intervenção visando melhorias no gerenciamento de resíduos das cidades e no aumento da vida útil do aterro sanitário.

- **Análise das características físicas e químicas da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos depositados no aterro.**

O teor de umidade dos resíduos do aterro sanitário apresentou valor médio de 73,50%. Tais valores estão dentro de uma faixa considerada como satisfatória por alguns autores para elevar a produção de gás metano em um aterro.

O pH da amostra de resíduo orgânico analisada apresentou valores ácidos, com média de 4,67, indicando valor característicos de resíduos orgânicos recém gerados, estando dentro dos valores reportados na literatura para resíduos em aterros sanitários.

Os sólidos totais voláteis apresentaram valor de aproximadamente 81%, apresentando perfil de alta biodegradabilidade e com grandes chances de sucesso em sistemas anaeróbios, pois quanto maior o teor de STV maior a quantidade de material que pode ser degradado.

- **Análise do potencial de geração de gás metano através de ensaios de Produção Bioquímico de Metano (BMP) da fração orgânica dos RSU**

Verificou-se que os reatores com inóculo produziram maiores volumes de gás metano em relação aos reatores sem inóculo. O maior volume de geração de CH_4 foi observado nos reatores com a presença de inóculo, de 7926,31 mL, com pico de produção no 10º dia de operação, e obteve também a maior taxa de produção de metano de $1691,16 \text{ mL.h}^{-1}$. Os reatores sem inóculo obtiveram um menor volume e taxa de produção de metano, 1020,42mL e $98,40 \text{ mL.h}^{-1}$, sua produção máxima ocorreu ao 30º dia de operação e durante o período estudado não atingiu a fase de estabilização.

O potencial de geração de gás metano, da fração orgânica inoculada, foi potencializada em quase 6,5 vezes mais em relação a fração orgânica não inoculada. Chegou-se ao valor do potencial no estudo de $207,80 \text{ NmLCH}_4/\text{gSV}$, estando dentro de valores reportados na literatura para resíduos orgânicos recém gerados.

- **Modelagem matemática da produção de metano, potência e energia para o aterro.**

A estimativa de geração de gás metano foi realizada pelos modelos LandGEM e IPCC em dois cenários diferentes. No cenário 1 foram utilizados os valores padrões recomendados por cada modelo para as condições regionais do aterro sanitário. O modelo LandGEM apresentou média, dentro do horizonte de 20 anos de recebimento de resíduos, de $13.930.352 \text{ Nm}^3/\text{ano}$ com pico máximo de $27.015.535 \text{ Nm}^3/\text{ano}$ e valor acumulado de metano $278.607.043 \text{ Nm}^3/\text{ano}$. Esse valor foi 38% superior às quantidades obtidas pelo modelo multicomponente IPCC, que apresentou média de geração de CH_4 de

10.085.810,65Nm³/ano com produção máxima de 18.197.305Nm³/ano e acumulado de 201.716.213Nm³/ano de produção de metano durante os 20 anos.

No segundo cenário, foi utilizado o valor do potencial de metano, determinado por ensaio BPM, para obtenção do carbono orgânico degradável da matéria orgânica (COD_{M.O}), sendo encontrado COD_{M.O} = 0,27. A partir do novo COD, foi determinado o potencial de geração de metano médio para aplicação no modelo LandGEM, L₀ = 131,53 Nm³CH₄/Ton_{RSU} e feito a substituição deste parâmetro no componente da matéria orgânica no modelo IPCC. A ferramenta LandGEM apresentou redução de 32% na produção de CH₄, com valor médio de produção 9.460.223 Nm³/ano, com pico em 2042 no valor de 16.339.291,29 Nm³/ano e acumulado 189.204.469 Nm³/ano. A modelagem no modelo IPCC apresentou média de 14.807.464Nm³/ano, pico máximo de 26.471.848,79 Nm³/ano e um acumulado na projeção de 20 anos de 296.149.281,2Nm³/ano, valor 46% maior quando comparado com o cenário anterior. Esse aumento foi ocasionado devido ao aumento do COD da matéria orgânica que resultou em mais de 80% na geração de metano por este material. Quando comparados os dois modelos, o IPCC apresentou maior geração de metano nesta nova configuração.

A determinação da potência e energia disponível foi realizada também em dois cenários, o mais otimista e o mais pessimista na geração de metano pelo modelo IPCC. Para o cenário mais otimista apresentou potência média, durante 20 anos, de 4504,36kW, com potencia máxima de 8052,60kW. A geração de energia média foi de 91.888,93kWh/dia, com máxima de 164.273,23kWh/dia e acumulado de 1.837.778,71 kWh/dia.

Para o cenário mais pessimista houve uma redução de 45% na potência disponível, sendo o valor médio de 3068,05kW, potência máxima de 5535,53kW. Em relação a energia disponível tem-se neste cenário geração média de 62.588,33kWh/dia, máxima de 108.615,56kWh/dia, em 2042.

7.2. Recomendações para pesquisas futuras

- Realizar, de maneira periódica, novos ensaios da composição gravimétrica dos RSU do aterro, para verificar se há mudanças significativas nos percentuais dos componentes dos resíduos após a criação da Lei 14.260/2021 que cria a política de incentivos às atividades de reciclagem;

- Propor implementação da metodologia para a composição gravimétrica por regionalização para outros aterros sanitários de Alagoas e de outras regiões com características semelhantes;
- Analisar diferentes concentrações de inóculos utilizados na pesquisa, a fim de proporcionar maior entendimento da influência desses elementos no processo de biodegradação e aumento significativo na produção de metano;
- Realizar ensaios BMP para os outros componentes dos resíduos sólidos do aterro sanitário, para que possa ser determinado o valor do potencial de geração de metano de cada componente e se obter uma melhor avaliação do potencial de geração de CH₄ de resíduos em aterros localizados em regiões do agreste nordestino;
- A partir dos dados de L₀ de cada componente do RSU, determinar o carbono orgânico degradável (COD) de cada um, para que possa ser utilizado em modelos multicomponentes, como IPCC, e assim obter uma maior confiabilidade na modelagem matemática da geração de gás metano do aterro sanitário;
- Realizar ensaios laboratoriais para determinação do potencial de geração de metano dos resíduos de diferentes idades do aterro para estabelecer curvas de geração ao longo do tempo;
- Estudar o potencial de geração de gás metano em reatores de escala maior, para avaliar a eficiência de diferentes metodologias e a influência do volume na amostragem do potencial de geração de CH₄.
- Obter dados de todos os municípios o quanto, em média, a população utiliza os componentes orgânicos como alimento de animais e adubos para plantações, o que pode resultar na diminuição de geração de matéria orgânica de algumas cidades;
- Realizar a quantificação real, da geração de gás metano, nos dutos do aterro para realizar os ajustes dos software e verificar os erros do uso de cada um na estimativa real de gás metano.

REFERÊNCIAS

- <https://drive.google.com/file/d/1MF6JXH44gtv9CET26UJr9xeu5yT4Bxey/view?usp=drive_web> Acesso em: 25 de novembro de 2021.
- ABIOGÁS. O Potencial Brasileiro do Biogás. São Paulo, SP. 2021. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2020/11/NOTA_TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf. Acesso em: 25 de abril de 2021.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2020/>>. Acesso em: 20 out. 2021.
- ABREU, E. F. Estudo da diversidade microbiana metanogênica em reatores UASB tratando esgoto sanitário. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
- ABREU, F. V. et al. Biogás de aterros sanitários para geração de energia renovável e limpa - um estudo de viabilidade técnica e econômica. In: IX Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM), 2009.
- ALCÂNTARA, P. B. Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 366p. Recife, 2007.
- ALCÂNTARA, P. B.; JUCÁ, J. F. T. Recalque em aterros: influência da composição dos resíduos sólidos urbanos, do clima e da biodegradação. *Geotecnia*, v. 118, p. 15-42, 2010.
- AL-KHATIB, I.A.; MONOU, M.; ZAHRA, A.S.A.; SHAHEEN, H.Q.; KASSINOS, D. (2010) Solid waste characterization, quantification and management practices in developing countries. A case study: Nablus district - Palestine. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 5, p. 1131-1138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.01.003>
- ALKMIN, D.E.; UBERTO JÚNIOR, L.R. (2017) Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do lixão do município de Maria

da Fé, estado de Minas Gerais. *Caminhos da Geografia*, v. 18, n. 61, p. 65-82. <https://doi.org/10.14393/RCG186105>

ALVES, I. R. F. S. Análise experimental do potencial de geração de biogas em resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2008.

AL-YAQOUT, A. F.; HAMODA, M. F. Movement of unlined landfill under preloading surcharge. *Waste management*, v. 27, n. 3, p. 448-458, 2007.

ANDRADE, J. C. S; COSTA, P. Mudança Climática, Protocolo de Kyoto e Mercado de Créditos de Carbono: Desafios à Governança Ambiental Global. *O&S*. v.15 Nº 45, 2008.

ANGELIDAKI, I. et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, v. 59. n. 5, p. 927-934, 2009.

APHA, AWWA, WEF. Standard methods for examination of water and wastewater. 22th edn.; 2012.

ARAÚJO, L. M.; NETO, M. R. C.; SEGUIN, E. A busca da efetividade do Acordo de Paris. *Revista Direito, Estado e Sociedade*, n. 54, 2020.

ASJA ENERGY (2017), Asja continua crescendo no brasil: usina de biogás é inaugurada. Disponível em: < <https://www.asja.energy/news/asja-continua-a-crescere-in-brasile-inaugurato-impianto-biogas/>>. Acesso em 30 de janeiro de 2022.

ASJA ENERGY (2019), A planta de biogás de Jaboatão, Brazil, entra em operação. Disponível em: <<https://www.asja.energy/pt-br/noticias/a-planta-de-biogas-de-jaboatao-brazil-entra-em-operacao/>>. Acesso em 30 de janeiro de 2022.

ASJA ENERGY (2019), João Pessoa: uma nova planta de biogás da Asja entra em operação. Disponível em: < <https://www.asja.energy/pt-br/noticias/joao-pessoa-uma-nova-planta-de-biogas-da-asja-no-brasil/>>. Acesso em 30 de janeiro de 2022.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12614 - Determinação da demanda bioquímica de oxigênio: Métodos de incubação. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6457 – amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro: BNDS, 2004.
- ATABI, F.; EHYAEI, M. A.; AHMADI, M. H.. Calculation of CH₄ and CO₂ emission rate in Kahrizak landfill site with LandGEM mathematical model. In: The 4th world sustainability forum. 2014. p. 1-17.
- BANDARA, N.J.G.J et al. Relation of waste generation and composition to socio-economic factors: a case study. *Environmental monitoring and assessment*, v. 135, n. 1-3, p. 31-39, 2007.
- BAYARD, R., et al. Organic matters stabilization of sorted MSW under leachate recirculation. *Proceedings Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3 - 7 October, 2005.*
- BEZERRA, C. R.; CAMPOS, K. F. S.. Avaliação da gestão e composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares do município de Manaíra-PB. *Inter Espaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, v. 5, n. 16, p. 10610, 2019.
- BIANEK, J. et al. Comparação entre metodologias USEPA e IPCC para estimativa teórica de produção de biogás em aterro municipal. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 3, n. 1, p. 34-40, 2017.
- BOUALLAGUI, H; LAHDHEB, H; BEN, R. E; RACHDI, B; HAMDI, M. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. *Journal of Environmental Management*, Londres, v. 90, n. 5, p. 1844–1849, 2009.

- BRASIL, Atlas. Atlas do desenvolvimento humano no Brasil 2013. Acesso em: Janeiro de 2019.
- BRASIL, Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: < <https://odsbrasil.gov.br>>. Acesso em 19 de março de 2022.
- BRASIL, Ministério do Desenvolvimento Regional (2021). Resíduos sólidos: maior aterro sanitário do Brasil é visitado pelo Governo Federal. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/residuos-solidos-maior-aterro-sanitario-do-brasil-e-visitado-pelo-governo-federal>>. Acesso em: 31 de janeiro de 2022.
- CANDIANI, G. Emissões fugitivas de gás metano em aterro sanitário. Campo Grande: Editora Inovar, 2020. 72p.
- CANDIANI, G; VIANA, E.. Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. GEOUSP Espaço e Tempo (Online), v. 21, n. 3, p. 845-857, 2017.
- CARVALHO, E. C. de. Levantamento e sistematização de dados para elaboração de um plano de gerenciamento integrado dos resíduos sólidos urbanos gerados no município de Marechal Deodoro/Al. Dissertação de Mestrado. Maceió: PPGRHS – UFAL, 2016.
- CASTILHOS JR, A.B. Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro. 2003, p. 294.
- CHAGANTI, S. R.; KIM, D. H.; LALMAN, J. A. Dark fermentati vehy drogen production by mixed anaerobic cultures: Effecto finoculum treatment methods on hydrogen yield. Renewable Energy, v. 48, n. July 2016, p. 117–121, 2012.
- CHEN, Ye; CHENG, Jay J; CREAMER, Kurt S. Inhibition of anaerobic digestion process : A review. v. 99, p. 4044–4064, 2008.
- CHERNICHARO C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AVGS) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005.
- CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Vol. 5 – Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: Segrac, 1997. 246 p.

- CHERNICHARO, C.A.L. Reatores anaeróbios – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. v.5. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- CHYNOWETH, D. P. et al. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and bioenergy*, v. 5, n. 1, p. 95-111, 1993.
- CIBIOGÁS. Nota Técnica: N° 001/2021 – Panorama do biogás no Brasil em 2020. Foz do Iguaçu, PR. 2021.
- CÓRDOBA, V. E.; SANTALLA, E. M.. Estimation of long-term methane emissions from Mechanical-Biological Treatment waste through biomethane potential test. *Environmental Technology*, p. 1-13, 2021.
- COSTA, M. D. Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos. Tese de doutorado. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife 2015.
- COSTA, M. S. S. M.; LUCAS JÚNIOR, J.; COSTA, L. A. M.; ORRICO, A. C. A. A highly concentrated diet increases biogas production and the agronomic value of young bull's manure. *Waste Management*. v. 48, p.521-527, 2016.
- CRUZ, M. L. F. R. (2005). A caracterização de resíduos sólidos no âmbito da sua gestão integrada (Doctoral dissertation).
- CRVR – Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos. Disponível em: <<https://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-residuos-do-recreio/>>. Acesso em 30 de janeiro de 2022.
- DA SILVA, Nicole Fernandes et al. First order models to estimate methane generation in landfill: A case study in south Brazil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 4, p. 104053, 2020.
- DAI, X. et al. Simultaneous enhancement of methane production and methane content in biogas from waste activated sludge and perennial ryegrass anaerobic co-digestion: the effects of pH and C/N ratio. *Bioresource technology*, v. 216, p. 323-330, 2016.
- DAMRONGSAK, Det; CHAICHANA, Chatchawan; WONGSAPAI, Wongkot. Small-

Scale Biogas Plant from Swine Farm in Northern Thailand. 1 dez. 2017, [S.l.]: Elsevier, 1 dez. 2017. p. 165–169. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217354371>>. Acesso em: 19 set. 2018.

DE SOUZA, Fernanda de Marco et al. Influência do inóculo na co-digestão anaeróbia de resíduos alimentares e grama. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 1, p. 146-156, 2020.

DE SOUZA, Marcos Eduardo. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. *Revista DAE*, v. 44, n. 137, p. 88-94, 1984.

DHAR, Hiya et al. Effect of organic loading rate during anaerobic digestion of municipal solid waste. *Bioresource technology*, v. 217, p. 56-61, 2016.

DIXON, P. J. et al. Effect of Substrate to Inoculum Ratio on Bioenergy Recovery from Food Waste, Yard Waste, and Biosolids by High Solids Anaerobic Digestion. *Environmental Engineering Science*, v. 36, n. 12, p. 1459-1465, 2019.

EDJABOU, M.E.; JENSEN, M.B.; GÖTZE, R.; PIVNENKO, K.; PETERSEN, C.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T.F. (2015) Municipal solid waste composition: Sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation. *Waste Management*, v. 36, p. 12-23.

EDWIGES, T. *et al.* Methane potential of fruit and vegetable waste: an evaluation of the semi-continuous anaerobic mono-digestion. *Environmental technology*, v. 41, n. 7, p. 921-930, 2020.

EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos plantas e fertilizantes. 2ª edição. Fábio César da Silva. Brasília – DF, 1999.

ENC ENERGY (2019). Enc Energy Brasil – Inauguração de Central no Maranhão. Disponível em: <<https://www.encenergy.com/pt/media-center/newsfeed/enc-energy-brasil-inauguracao-de-central-no-maranhao/>>. Acesso em: 31 de Janeiro de 2022.

- EPA -U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2005). Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#software>.
- FALLAHIZADEH, S. et al. Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran. *MethodsX*, v. 6, p. 391-398, 2019.
- FAPESB – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (2011). Salvador ganha primeira termelétrica movida a biogás do Nordeste. Disponível em: <http://www.fapesb.ba.gov.br/salvador-ganha-primeira-termeletrica-movida-a-biogas-do-nordeste/>. Acesso em: 25 de janeiro de 2022.
- FARIAS, R. M. S. Análise de rotas tecnológicas para gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos: caso do Distrito Federal. Tese de doutorado 2018.
- FIGUEIREDO, J. C. Estimativa de Produção de Biogás e Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos em Minas Gerais. Dissertação apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte, 2012.
- FIRMO, A. L. B.. Estudo Numérico e Experimental da Geração de Biogás a partir da Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado. Recife: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPE, 2013.
- FOBIL, J. N.; CARBOO, D.; ARMAH, N.A. Evaluation of municipal solid wastes (MSW) for utilisation in energy production in developing countries. *International journal of environmental technology and management*, v. 5, n. 1, p. 76-86, 2005.
- FOSTER-CARNEIRO et al. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactor treating food waste. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 6994- 7002, 2008.
- FRARE, L. M; GIMENES, M. L; PEREIRA, N. C. Processo para Remoção de Ácido Sulfídrico de Biogás. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol. 14 Nº 2. abr/jun. 2009, 167-172.

- FUCALE, S. P. Resistência em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. In: I Seminário de Tese de D.sc, CTG/UFPE, Recife, PE, Brasil, 2002.
- GAO, M. et al. Biogas potential, utilization and countermeasures in agricultural provinces: A case study of biogas development in Henan Province, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 99, n. May 2018, p. 191–200, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.005>>.
- GAWANDE, N. A. et al. Municipal solid waste in situ moisture content measurement using an electrical resistance sensor. *Waste Management*, v. 23, n. 7, p. 667-674, 2003.
- GERA ENERGIA (2019). Disponível em: < <https://grupogera.com/gera-energia>>. Acesso em: 31 de Janeiro de 2022.
- GHASEMIAN, M.; ZILOUEI, H.; ASADINEZHAD, A. Enhanced Biogas and Biohydrogen Production from Cotton Plant Wastes Using Alkaline Pretreatment. *Energy & Fuels*, v. 30, n. 12, p. 10484-10493, 2016.
- GOIS, G. N. S. B. Produção de hidrogênio e metano a partir da vinhaça de cana-de-açúcar em reatores anaeróbios de leito fluidizado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2017.
- GUERI, M. V. D. *et al.* Digestão anaeróbia de resíduos alimentares utilizando ensaios bmp. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 3, n. 1, p. 08-16, 2017.
- HARYANTO, A.; HASANUDIN, U.; CHANDRA, A.; ISKANDAR, Z. Biogas production from anaerobic codigestion of cowdung and elephant grass (*Pennisetum purpureum*) using batch digester. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 141, 2018.
- HASAN, C. et al. Análise da sinergia de resíduos agroindustriais submetidos a biodigestão anaeróbia visando biogás para aproveitamento energético. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 8, n. 3, p. 190-199, 2017.
- HASAN, C., FEITOSA, A. K., & DE ALMEIDA, M. C. (2019). Produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais: análise dos teores de sólidos totais, voláteis e

fixos em amostras pré e pós digestão anaeróbia1. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 8(1), 257-273.

HOLLIGER, Christof et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, v. 74, n. 11, p. 2515–2522, 2016.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Método Físico-Químico para Análise de Alimentos. Instituto Adolfo Lutz. São Paulo. 1986, p. 1020.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (1996). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Report produced for invitation of the United Nations Framework Convention on Climate Change.

IPCC, Inter governmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. Capítulo 3: Solid Waste Disposal. Disponível em: http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf.

JADOON, A.; BATOOL, S.A.; CHAUDHRY, M.N. (2014) Assessment of factors affecting household solid waste generation and its composition in Gulberg Town, Lahore, *Pakistan. Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 16, n. 1, p. 73-81. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-013-0146-5>

JUCÁ et al. Monitoramento Ambiental do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca. In: III Seminário Nacional sobre Resíduos Sólidos Urbano, 1999.

JUCÁ, J. F. T. (2002b). Relatório Final: Diagnóstico de resíduos sólidos do estado de Alagoas. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento / MMA.

JUCÁ, J. F. T. Aproveitamento Energético do Biogás de Aterros Sanitários de RSU, 2021. Slides. Disponível em:

KAFLE, G. K.; CHEN, L. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste management*, v. 48, p. 492-502, 2016.

- KARANJEKAR, Richa V. et al. Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: the CLEEN model. *Waste Management*, v. 46, p. 389-398, 2015.
- KLINK, R. E.; HAM, R. K. Effects of moisture movement on methane production in solid waste landfill samples. *Resources and Conservation*, v. 8, n. 1, p. 29-41, 1982.
- KORMI, Tarek et al. Estimation of fugitive landfill methane emissions using surface emission monitoring and Genetic Algorithms optimization. *Waste management*, v. 72, p. 313-328, 2018.
- KUMAR, S. et al. Estimation method for methane emission from solid waste landfills. *Atmospheric Environment*, v. 38, n. 21, p. 3481-3487, 2004.
- LAKIOTI, E. N. et al. Sustainable solid waste management: Socio-economic considerations. *Chemical Engineering Transactions*, v. 56, p. 661-666, 2017.
- LALMAN, J. A.; BAGLEY, D. M. Anaerobic degradation and methanogenic inhibitory effects of oleic and stearic acids. *Water Research*, v. 35, n. 12, p. 2975-83, ago. 2001.
- LANDIM, A. L. P. F., & Azevedo, L. P. D. (2008). O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável.
- LANDIM, A. P. M. et al. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. *Polímeros*. V.26, n. spe, p. 82-92, 2016.
- LAPA, K. L. Avaliação da recirculação da fase líquida e do regime de alimentação no reator anaeróbio, em escala piloto, operado em bateladas sequenciais contendo biomassa imobilizada (ASBBR), no tratamento de esgoto sanitário. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006
- LAY, J.-J.; LI, Y.-Y.; NOIKE, T. Effect of moisture content and chemical nature on methane fermentation characteristics of municipal solid wastes. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, v. 1996, n. 552, p. 101-108, 1996.
- LE HYARIC, R. et al. Influence of moisture content on the specific methanogenic activity of dry mesophilic municipal solid waste digestate. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 87, n. 7, p. 1032-1035, 2012.

- LEITE, V. D. et al. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 2, p. 190-196, 2009.
- LI, G. et al. Evaluating Methane Production from Anaerobic Mono- and Co- digestion of Kitchen Waste, Corn Stover, and Chicken Manure. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. v 171. n 1, p. 117-127 2013.
- LIMA, H. M. Evolução tectônica da porção nordeste da faixa sergipana, Província Borborema, estado de Alagoas, NE do Brasil. 2018
- LIMA, H. Q. Determinação de parâmetros cinéticos do processo de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de Santo André–SP por meio de testes do potencial bioquímico de metano. 2016. Tese de Doutorado em Energia; Universidade Federal do ABC, Santo André.
- LIMA, L. M. Q. Tratamento e Biorremediação. 3ed. São Paulo: Hemus Livraria, 265p. 2004.
- LIMA, N. C. Análise de tipos e concentrações de inóculos para potencializar a geração de biogás na digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares (FORSD) do Bairro Pici, Fortaleza–CE. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2015.
- LIMA, N. C. Análise de tipos e concentrações de inóculos para potencializar a geração de biogás na digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares do bairro planalto pici, fortaleza – CE. U.F.C. Dissertação de mestrado.140 p, 2015.
- LIU, G. et al. Influence of pH adjustment and inoculum on anaerobic digestion of kitchen waste for biogas producing. *Journal of biobased materials and bioenergy*, v. 5, n. 3, p. 390-395, 2011.
- LUCENA, T. V. Avaliação da geração de biogás sob diferentes condições de biodegradação de resíduos alimentares. Dissertação de mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências – CTG. Universidade Federal de Pernambuco – Recife, 2016.

- LUKITAWESA et al. Factors influencing volatile fatty acids production from food wastes via anaerobic digestion. *Bioengineered*, v. 11, n. 1, p. 39-52, 2020.
- MACHADO, L. R. et al. O estado da arte da digestão anaeróbia de soro de leite e de dejetos da suinocultura para produção de biogás. *Revista Tecnológica*, v. 27, n. 1, p. 104-119, 2018.
- MACIEL, F. J. Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos. Tese de doutorado. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife 2009.
- MADSEN, M.; HOLM-NIELSEN, J. B.; ESBENSEN, K. H. Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 6, p. 3141–3155, 2011.
- MAGALHÃES, G. V. V.. Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real. Tese de Doutorado, Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2018.
- MAINTINGUER, S. I. et al. Fermentative hydrogen production by microbial consortium. *International Journal of Hydrogen Energy*. V. 33, P. 4309–4317, 2008.
- MARIANO, M. O. H.. Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – UFPE, Recife, 2008.
- MARIANO, M.O. H.; JUCÁ, J. F. T. Ensaios de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 3, p. 223-228, 2010.
- MELO, E.S.R.L. Relatório de atividades do projeto “redução dos gases de efeito estufa através do aproveitamento do biogás proveniente de aterros de resíduos sólidos”. PRONEX-FACEPE. Grupo de Resíduos Sólidos – Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

- MELO, E.S.R.L. Análise de biodegradabilidade dos materiais que compõem os resíduos sólidos urbanos através de ensaios BMP (Biochemical Methane Potential). 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- MELO, M. C. et al. Deformação vertical dos resíduos sólidos urbanos em uma célula experimental em função da composição gravimétrica e volumétrica dos materiais. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 21, n. 2, p. 450-460, 2016.
- MELO, M. C. et al. Microbiologia de resíduos sólidos urbanos e sua relação com a deformação vertical da massa aterrada. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. vol.19 no.3 Rio de Janeiro July/Sept. 2014.
- MELO, M. C. Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Recife 2003.
- MENDES, L. G. G.; SOBRINHO, P. M. Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. *Revista Biociências*, v. 13, 2007.
- MENEZES, R. O. et al. Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, n. 2, p. 271-282, 2019.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2012.
- MIRANDA, Y. C.; NETO, F. F. M. Viabilidade do uso de biogás como fonte de energia renovável em aterros sanitários. *Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes*, v. 5, n. 12, 2017.
- MONTEIRO, J. H. P.; & ZVEIBIL, V. Z. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001
- MONTEIRO, V. E. D. et al. Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 223-230, 2006.

- MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil - Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 888–903, 2015.
- MOREIRA, F. G. S. et al. Emissões fugitivas de biogás em camada de cobertura de solo compactado em aterro sanitário. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 25, n. 2, p. 247-258, 2020.
- MOREIRA, L.A.; SILVA, T.A.C.; BARROS, R.M. (2017) Análise da produção de biogás sob diferentes cenários de gerenciamento de resíduos sólidos no município de Inconfidentes – MG. *Labor e Engenho*, v. 11, n. 1, p. 30-36. <https://doi.org/10.20396/labore.v11i1.8647872>.
- NAMLIS, K. G; KOMILIS, D. Influence of four socioeconomic indices and the impact of economic crisis on solid waste generation in Europe. *Waste management*, v. 89, p. 190-200, 2019.
- NASCIMENTO, M. C. B., FREIRE, E. P., DANTAS, F. D. A. S., & GIANSANTE, M. B. (2019). State of art of landfills that use biogas for the generation of electrical energy and biomethane in Brazil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(1), 143-155.
- NOGUEIRA, C.E.C.; et al. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State , Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 48, p. 300–305, 2015.
- NOUSHEEN ARIF, K. Determination of hydro-mechanical characteristics of biodegradable waste-laboratory and landfill site. Tese de doutorado. Franch: Universiteof Grenoble, 2010.
- NUNES, J. O. R.; Análise textural de argissolos e latossolos para obtenção do material de cobertura de aterros sanitários e controlados para a região de Presidente Prudente–SP. V Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2004.
- OGWUELEKA, T.C. (2013) Survey of household waste composition and quantities in Abuja, Nigeria. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 77, p. 52-60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.011>

- OLIVEIRA, L. R. G. Estudo para a metanização de resíduos alimentares. Tese de Doutorado. Recife: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPE, 2018.
- OLIVEIRA, R.A. Efeito das concentrações dos sólidos suspensos do efluente no desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, 1997.
- PECORA, V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo. In: Congresso Internacional de Bioenergia, IV, Curitiba–PR. 2009.
- PEREIRA, E. V. Resíduos sólidos. Editora Senac São Paulo, 2019.
- PIÑAS, J. A. V. et al. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). Revista Brasileira de Estudos de População, v. 33, p. 175-188, 2016.
- PINTO, F. A. F.; MIYAMARU, E. S.; KLAUSSNER, M. A.; RAUCCI, C. Avaliação de degradabilidade de embalagens plásticas utilizadas no acondicionamento de resíduos sólidos urbanos. Revista de saúde, meio ambiente e sustentabilidade, v.9, n.1, 2014.
- PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável. Ministério do Meio Ambiente – MMA, São Paulo, 2010.
- REICHERT, G.A. (2019) – Rotas tecnológicas para RSU - Curso ProteGGEr - Natal (RN). Disponível em: rotegeer.gov.br/images/documents/518/1.%20Rotas%20Tecnológicas_Geraldo%20Reichert.pdf. Acesso em: 19 de março de 2022.
- ROGOFF, M. J.; SCREVE, F. Waste-to-energy: technologies and project implementation. Academic Press, 2019.

- RUOSO, A. C. et al. The impact of landfill operation factors on improving biogas generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 154, p. 111868, 2022.
- SAIDU, M. et al. Influence of palm oil mill effluent as inoculum on anaerobic digestion of cattle manure for biogas production. *Bioresource technology*, v. 141, p. 174-176, 2013.
- SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. *Biomassa & Energia*, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.
- SANCHEZ, E. et al. Effect of temperature and pH on the kinetics of methane production, organic nitrogen and phosphorus removal in the batch anaerobic digestion process of cattle manure. *Bioprocess Engineering*, v. 22, n. 3, p. 247-252, 2000.
- SANTANA, M. S. A. de. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos do Futuro Aterro Sanitário Sediado no Município de Arapiraca – AL. Dissertação de Mestrado. Maceió: PPGRHS – UFAL, 2016.
- SANTOS, M. M.; ROMANEL, C.; 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 Sanitaria e Ambiental*, v. 22, p. 1151-1162, 2017.
- SEMARH –SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE ALAGOAS. Plano Intermunicipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Agreste: Produto3 – Etapa 2.1- Relatório do diagnóstico da gestão intermunicipal de resíduos sólidos. Relatório Técnico. Maceió, 2015.
- SILVA, A. S. et al. Identificação dos componentes potencialmente perigosos presentes nos resíduos sólidos urbanos da cidade de campina grande – PB, através da sua composição gravimétrica. In: I Conferência Internacional em Gestão Ambiental Colaborativa (CIGAC). Anais... Sousa – Paraíba: Junho, 2012.

- SILVA, Alessandra dos Santos. Análise de componentes tóxicos em resíduos sólidos urbanos. Tese de doutorado Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande - PB, 2016.
- SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N. de; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, p. 95-104, 2013.
- SIMÕES, G. F. et al. Recalques em resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário de belo horizonte. In: XI Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio Grande do Norte, 2004.
- SIQUEIRA, L. M. Influência da taxa de carregamento orgânico na degradação anaeróbia da vinhaça em reator de leito fluidizado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2008.
- SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G.. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos-Caieiras. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 22, p. 993-1003, 2017.
- SOLOS, Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, v. 5, 2018.
- SOUZA, A. R. et al. Análise do potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro e simulação de emissões de gases do efeito estufa em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, n. 5, p. 887-896, 2019.
- SPEECE, R.E. *Anaerobic biotechnology: for industrial wastewater*. Nashville: Archae, 1996. 394p.
- SPOKAS, K. et al. Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?. *Waste management*, v. 26, n. 5, p. 516-525, 2006.

- STEFANUTTI, Ronaldo et al. Ensaio de potencial bioquímico de metano na digestão de resíduos sólidos orgânicos. 2019.
- STEIL, L. Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos. 108 f. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- STEINER, P.A. (2010.) Gestão de resíduos sólidos em centros comerciais do município de Curitiba - PR. *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.*
- STROOT, P. G. et al. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. Digester performance. *Water research*, v. 35, n. 7, p. 1804-1816, 2001.
- TAVARES, J. C. L. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Maceió-al. Dissertação apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas, UFAL. Maceió, 2008.
- TERMOVERDE, [s.d]. Termoverde Caieiras. Disponível em: <<https://www.termoverde.com.br>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2022.
- TOM, A. P.; PAWELS, R.; HARIDAS, A. Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content. *Waste management*, v. 49, p. 64-72, 2016.
- TRANG, P. T.T. et al. The effects of socio-economic factors on household solid waste generation and composition: a case study in Thu Dau Mot, Vietnam. *Energy Procedia*, v. 107, p. 253-258, 2017.
- TSUTIYA, M.T. Abastecimento de Água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- TUNES, C. R. Produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de efluentes orgânicos em reator UASB. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia). Universidade Federal do Tocantins. Gurupi, 2017.
- United Nations Economic Commission for Europe. 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). 2018. COP 24 e Mudanças Climáticas. Disponível em: <<https://www.un.org/en/academic-impact/unai-quiz-cop24-and-climate-change>>.

Acesso em: 20 de fevereiro de 2022.

VAVILIN, V. A.; ANGELIDAKI, Irini. Anaerobic degradation of solid material: importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model. *Biotechnology and bioengineering*, v.89, n.1, p.113-122, 2005.

VOGT, W. G.; AUGENSTEIN, D. Comparison of models for predicting landfill methane recovery. Final report. SCS Engineers, Reston, VA (United States); Inst. for Environmental Management, Palo Alto, CA (United States), 1997.

WANGYAO, Komsilp et al. Application of the IPCC Waste Model to solid waste disposal sites in tropical countries: case study of Thailand. *Environmental monitoring and assessment*, v. 164, n. 1, p. 249-261, 2010.

WARD, Alastair J et al. Bioresource Technology Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. v. 99, p. 7928–7940, 2008.

WOON, K. S.; LO, I. M. C. A proposed framework of food waste collection and recycling for renewable biogas fuel production in Honk Kong. *Waste Management*, v. 47, p. 3-10, 2016.

XU, F. et al. Anaerobic digestion of food waste—Challenges and opportunities. *Bioresource technology*, v. 247, p. 1047-1058, 2018.

ZANETTE, A. L. Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

ZAVARISE, J. P.; PIMASSONI, Y. S.; PINOTTI L. M., LEMOS, E. C. L. Theoretical emissions of landfill biogas and its energy use in Brazil: a bibliometric study. *Latin American Journal of Energy Research – Lajer* (2021) v.8, n.1, pp.96–108. <https://doi.org/10.21712/lajer.2021.v8.n1.p96-108>.

ZHANG, C.; SU, H.; BAEYENS, J.; TAN, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 383-392, 2014.

ZHANG, D. et al. New sludge pretreatment method to improve methane production in waste activated sludge digestion. *Environmental science & technology*, v. 44, n. 12, p. 4802-4808, 2010.

ZHANG, Q., HU, J., & LEE, D. J. (2016). Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates. *Renewable Energy*, 98, 108-119.

ZHANG, R.; EL-MASHAD, H. M.; HARTMAN, K.; WANG, F.; LIU, G.; CHOATE, C.; GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, v. 98, p. 929-935, 2007.

**APÊNDICE A - INDICADORES SOCIOECONÔMICOS DOS MUNICÍPIOS
QUE INTEGRAM A CTR AGRESTE**

Município	IDHM 2010	Renda per capita 2010	PIB <i>per capita</i>, a preços correntes (R\$ 1,00) 2019
Arapiraca	0,649	423,28	21468,19
Belém	0,593	309,5	24489,06
Campo Alegre	0,570	217,72	8940,84
Campo Grande	0,524	181,54	9793,23
Coité do Nória	0,533	203,15	12296,76
Craíbas	0,525	199,54	10322,9
Estrela de Alagoas	0,534	196,92	6459,43
Feira Grande	0,533	193,07	14876,1
Girau do Ponciano	0,536	177,55	9301,79
Igaci	0,564	241,17	8585,4
Igreja Nova	0,568	254,34	15788,47
Junqueiro	0,575	306,96	13374,67
Lagoa da Canoa	0,552	231,56	11749,95
Limoeiro de Anadia	0,580	285,98	17834,29
Maribondo	0,597	297,05	11725,97
Minador do Negrão	0,563	231,37	10978,56
Olho d'Água Grande	0,503	151,62	9854,21
Palmeira dos Índios	0,638	391,37	12934,16
Paulo Jacinto	0,589	247,2	10264,08
Penedo	0,630	339,15	12505,56
Piaçabuçu	0,572	227,65	17458,15
Porto Real do Colégio	0,551	195,26	10088,72
Quebrangulo	0,559	224,78	12314,86
São Brás	0,572	220,92	13112,57
São Sebastião	0,549	225,84	16515,04
Tanque d'Arca	0,555	217,85	9730,38
Taquarana	0,541	215,16	15653,32
Teotônio Vilela	0,564	244,39	11452,33
Traipu	0,532	178,79	7246,99
Média ponderada do aterro	0,591	297,63	14785,68

Fonte: Altas, 2020.

**APÊNDICE B – EQUAÇÕES DE CRESCIMENTO POPULACIONAL DAS
CIDADES**

Município	Ajuste	Equação	R²
Arapiraca	Logarítmico	$(5,55E+06).ln(x) + (-42052854,96)$	0,983
Belém	Geométrico	$(4,38E-08).(X ^ 3,19)$	0,036
Campo Alegre	Linear	$(4,50E+02).X + (-883587,36)$	0,967
Campo Grande	Logarítmico	$(1,04E+05).ln(x) + (-787459,06)$	0,880
Coité do Nóia	Logarítmico	$(8,31E+04).ln(x) + (-629072,90)$	0,825
Craíbas	Logarítmico	$(2,24E+05).ln(x) + (-1699972,51)$	0,984
Estrela de Alagoas	Logarítmico	$(9,67E+04).ln(x) + (-731923,04)$	0,971
Feira Grande	Logarítmico	$(8,05E+04).ln(x) + (-609081,01)$	0,942
Girau do Ponciano	Linear	$(2,18E+02).X + (-427522,38)$	0,987
Igaci	Logarítmico	$(1,44E+05).ln(x) + (-1089755,80)$	0,929
Igreja Nova	Logarítmico	$(8,74E+04).ln(x) + (-659968,30)$	0,989
Junqueiro	Linear	$(1,26E+02).X + (-246623,61)$	0,919
Lagoa da Canoa	Logarítmico	$(2,85E+05).ln(x) + (-2156391,73)$	0,901
Limoeiro de Anadia	Geométrico	$(4,31E-108).(X ^ 33,51)$	0,969
Maribondo	Geométrico	$(1,02E-59).(X ^ 19,06)$	0,752
Minador do Negrão	Logarítmico	$(4,27E+04).ln(x) + (-322601,95)$	0,797
Olho d'Água Grande	Logarítmico	$(2,24E+04).ln(x) + (-169036,06)$	0,963
Palmeira dos Índios	Logarítmico	$(1,26E+06).ln(x) + (-9554570,17)$	0,972
Paulo Jacinto	Logarítmico	$(4,28E+04).ln(x) + (-320934,42)$	0,860
Penedo	Logarítmico	$(1,01E+06).ln(x) + (-7651831,39)$	0,982
Piaçabuçu	Logarítmico	$(2,17E+05).ln(x) + (-1636888,90)$	0,894
Porto Real do Colégio	Logarítmico	$(1,19E+05).ln(x) + (-900631,72)$	0,958
Quebrangulo	Exponencial	$(5,18E-01).[e ^ (0,005.X)]$	0,710
São Brás	Logarítmico	$(5,63E+04).ln(x) + (-425399,86)$	0,802
São Sebastião	Logarítmico	$(4,47E+05).ln(x) + (-3389407,50)$	0,961
Tanque d'Arca	Logarítmico	$(3,81E+04).ln(x) + (-287489,75)$	0,731
Taquarana	Linear	$(1,04E+02).X + (-204127,09)$	0,937
Teotônio Vilela	Logarítmico	$(1,34E+06).ln(x) + (-10194454,94)$	0,955
Traipu	Logarítmico	$(2,18E+05).ln(x) + (-1652778,83)$	0,958

APÊNDICE C – PROJEÇÃO POPULACIONAL DE CADA MUNICÍPIO INTEGRANTE DA CTR AGRESTE

Município	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2041	2042
Arapiraca	231.747	235008	237685	240493	243689	245978	248189	251448	254183	256917	259650	262381	265111	267839	270567	273292	276017	281462	284183	286902
Belém	1566	1568	1571	1573	1576	1578	1581	1583	1586	1588	1591	1593	1596	1598	1601	1603	1606	1611	1613	1616
Campo Alegre	25866	26316	26766	27216	27666	28115	28565	29015	29465	29915	30364	30814	31264	31714	32163	32613	33063	33963	34412	34862
Campo Grande	4618	4670	4721	4772	4824	4875	4926	4978	5029	5080	5131	5183	5234	5285	5336	5387	5438	5540	5591	5642
Coité do Nóia	3324	3365	3407	3448	3489	3530	3571	3612	3652	3693	3734	3775	3816	3857	3898	3938	3979	4061	4101	4142
Craibas	8446	8557	8667	8778	8889	9000	9111	9221	9332	9442	9553	9663	9774	9884	9994	10104	10215	10435	10545	10655
Estrela de Alagoas	4292	4340	4387	4435	4483	4531	4578	4626	4674	4721	4769	4817	4864	4912	4959	5007	5054	5149	5196	5244
Feira Grande	3910	3950	3989	4029	4069	4109	4148	4188	4228	4267	4307	4347	4386	4426	4465	4505	4545	4623	4663	4702
Girau do Ponciano	13615	13833	14052	14270	14488	14706	14924	15142	15361	15579	15797	16015	16233	16451	16670	16888	17106	17542	17760	17979
Igaci	6644	6716	6787	6858	6929	7000	7071	7142	7213	7284	7355	7426	7497	7567	7638	7709	7780	7921	7992	8062
Igreja Nova	5328	5371	5414	5457	5501	5544	5587	5630	5673	5716	5759	5802	5845	5888	5931	5974	6017	6102	6145	6188
Junqueiro	8424	8550	8677	8803	8929	9055	9181	9307	9433	9560	9686	9812	9938	10064	10190	10316	10443	10695	10821	10947
L.da Canoa	9490	9630	9771	9911	10052	10192	10333	10473	10613	10753	10893	11033	11173	11313	11453	11593	11732	12011	12151	12290
Limoeiro de Anadia	2655	2699	2744	2790	2837	2884	2932	2981	3031	3081	3132	3184	3237	3291	3346	3401	3458	3573	3632	3693
Maribondo	10147	10243	10340	10438	10536	10636	10736	10838	10940	11043	11147	11252	11358	11465	11573	11682	11792	12014	12127	12240
Minador do Negrão	2256	2277	2298	2319	2340	2361	2382	2403	2424	2445	2466	2487	2508	2529	2550	2571	2592	2634	2655	2676
Olho d'Água Grande	1269	1280	1291	1302	1313	1324	1335	1346	1357	1368	1379	1390	1401	1412	1423	1434	1445	1467	1478	1489
Palmeira dos Índios	77841	78466	79090	79714	80337	80960	81583	82206	82828	83450	84071	84693	85314	85934	86555	87175	87795	89033	89652	90271
Paulo Jacinto	5085	5106	5127	5148	5169	5191	5212	5233	5254	5275	5296	5317	5338	5359	5380	5401	5422	5464	5485	5506

APÊNDICE D – QUANTITATIVO DE RSU DESTINADOS AO ATERRO (ANO 2020 E 2021).

Município	Pop. Atendida 2020	Massa RSU (ton.) 2020	Per capita (kg/hab/dia)	Pop. Atendida 2021	Massa RSU (ton.) 2021	Per capita (kg/hab/dia)
Arapiraca	227357	89.652	1,08	229008	87.543	1,03
Belém	1.329	608	1,25	1.545	586	1,04
Campo Alegre	25.092	6.893	0,75	24.105	7.187	0,82
Campo Grande	4.433	1.113	0,69	4.256	1.108	0,71
Coité do Nóia	3.640	841	0,63	3.020	765	0,69
Craíbas	7.868	3.288	1,14	7.933	3.155	1,09
Estrela de Alagoas	4.263	1.280	0,82	4.023	1.365	0,93
Feira Grande	3.559	1.821	1,40	3.714	2.010	1,48
Girau do Ponciano	12.729	3.802	0,82	12.683	4.043	0,87
Igaci	6.288	2.394	1,04	6.226	2.566	1,13
Igreja Nova	5.040	2.822	1,53	5.134	2.772	1,48
Junqueiro	8.093	4.443	1,50	7.838	4.410	1,54
Lagoa da Canoa	8.924	2.685	0,82	8.642	2.595	0,82
Limoeiro de Anadia	6.553	2.715	1,14	6.874	3.002	1,20
Maribondo	9.666	2.498	0,71	9.364	2.350	0,69
Minador do Negrão	2.272	472	0,57	2.119	446	0,58
Olho d'Água Grande	1.244	329	0,72	1.216	400	0,90
Palmeira dos Índios	77841	16.189	0,57	78466	14.324	0,50
Paulo Jacinto	4.997	1.104	0,61	4.960	1.218	0,67
Penedo	47.606	12.623	0,73	47.938	12.557	0,72
Piaçabuçu	10.827	3.207	0,81	11.024	2.917	0,72
Porto Real do Colégio	6.972	2.445	0,96	6.815	2.418	0,97
Quebrangulo	6.343	1.690	0,73	6.241	1.582	0,69
São Brás	3.302	1.005	0,83	3.322	1.037	0,86
São Sebastião	13.186	4.872	1,01	12.963	4.215	0,89
Tanque d'Arca	2.146	625	0,80	2.132	679	0,87
Taquarana	7.719	2.214	0,79	6.505	2.290	0,96
Teotônio Vilela	37.507	7.547	0,55	37.252	8.764	0,64
Traipu	8.690	1.365	0,43	8.740	1.246	0,39

APÊNDICE E – DADO DA CROMATOGRAFIA DOS REATORES

Reator 1

TEMPO (DIAS)	TEMPO (horas)	ÁREA CH4	nCH4 (MMOL)	nCH4 HEADSPACE (MMOL)	nCH4 ACUMULADO(MMOL)	VOLUME HEADSPACE (mL)	VOLUME ACUMULADO (mL)
4,025694444	96,62	40129	0,000080258	0,561806	0,561806	14,18164163	14,18164163
4,996527778	119,92	42005	0,00008401	0,58807	1,149876	14,84462251	29,02626414
6,972222222	167,33	85367	0,000170734	1,195138	2,345014	30,16881061	59,19507474
7,957638889	190,98	107708	0,000215416	1,507912	3,852926	38,06414953	97,25922428
10,99444444	263,87	129864	0,000259728	1,818096	5,671022	45,89410921	143,1533335
12,98125	311,55	134143	0,000268286	1,878002	7,549024	47,40631346	190,5596469
14,97708333	359,45	129529	0,000259058	1,813406	9,36243	45,77571977	236,3353667
17,99513889	431,88	336110	0,00067222	0,941108	10,303538	23,75634363	260,0917103
21,00208333	504,05	451779	0,000903558	1,2649812	11,5685192	31,93185912	292,0235695
24,99861111	599,97	392119	0,000784238	1,0979332	12,6664524	27,71507455	319,738644
27,97916667	671,50	527966	0,001055932	1,4783048	14,1447572	37,31677642	357,0554204
32,02569444	768,62	176693	0,000353386	2,473702	16,6184592	62,44353969	419,4989601
32,96875	791,25	1345165	0,00269033	3,766462	20,3849212	95,07661771	514,5755778
33,98055556	815,53	2066135	0,00413227	5,785178	26,1700992	146,0349679	660,6105457
34,99861111	839,97	2261565	0,00452313	6,332382	32,5024812	159,8480119	820,4585576
37,02291667	888,55	2011924	0,004023848	5,6333872	38,1358684	142,2033201	962,6618777
38,97916667	935,50	792098	0,001584196	2,2178744	40,3537428	55,98569598	1018,647574
40,98611111	983,67	754080	0,00150816	2,111424	42,4651668	53,2985737	1071,946147
45,97916667	1103,50	540325	0,00108065	1,51291	43,9780768	38,1903138	1110,136461
49,94097222	1198,58	336589	0,000673178	0,9424492	44,920526	23,79019948	1133,926661
54,97777778	1319,47	187542	0,000375084	0,5251176	45,4456436	13,25551813	1147,182179
59,58333333	1430,00	146581	0,000293162	0,4104268	45,8560704	10,36038382	1157,542563
63,58333333	1526,00	141236	0,000282472	0,3954608	46,2515312	9,982597807	1167,52516
67,58333333	1622,00	140258	0,000280516	0,3927224	46,6442536	9,913472509	1177,438633
74,58333333	1790,00	102368	0,000204736	0,2866304	46,930884	7,235397295	1184,67403
80,58333333	1934,00	87452	0,000174904	0,2448656	47,1757496	6,181130473	1190,855161
87,58333333	2102,00	115236	0,000230472	0,3226608	47,4984104	8,144910936	1199,000072
91,58333333	2198,00	86985	0,00017397	0,243558	47,7419684	6,148122789	1205,148194
94,58333333	2270,00	66328	0,000132656	0,1857184	47,9276868	4,68808057	1209,836275

Reator 2

TEMPO DI	TEMPO DE OPERA	ÁREA CH4	nCH4 (MMOL)	nCH4 HEADSPACE (MMOL)	nCH4 ACUMULADO(MMOL)	VOLUME HEADSPACE (mL)	VOLUME ACUMULADO (mL)
4,031944	96,77	30893	0,000061786	0,432502	0,432502	10,91762702	10,91762702
4,998611	119,97	35415	0,00007083	0,49581	0,928312	12,5157078	23,43333482
6,977083	167,45	74881	0,000149762	1,048334	1,976646	26,46304435	49,89637917
7,9625	191,10	24499	0,000048998	0,342986	2,319632	8,657978974	58,55435815
10,99861	263,97	136148	0,000272296	1,906072	4,225704	48,11488311	106,6692413
12,98681	311,68	109242	0,000218484	1,529388	5,755092	38,60626716	145,2755084
14,98194	359,57	99969	0,000199938	1,399566	7,154658	35,3291767	180,6046851
18	432,00	391239	0,000782478	1,0954692	8,2501272	27,65287592	208,257561
21,00694	504,17	355741	0,000711482	0,9960748	9,246202	25,1438679	233,4014289
25,00347	600,08	436333	0,000872666	1,2217324	10,4679344	30,84013176	264,2415607
27,98403	671,62	427725	0,00085545	1,19763	11,6655644	30,23171604	294,4732767
32,02569	768,62	176693	0,000353386	2,473702	14,1392664	62,44353969	356,9168164
32,97431	791,38	948401	0,001896802	2,6555228	16,7947892	67,03323333	423,9500498
33,98472	815,63	1225870	0,00245174	3,432436	20,2272252	86,64481559	510,5948654
35,00417	840,10	813415	0,00162683	2,277562	22,5047872	57,49238718	568,0872525
37,02778	888,67	1445813	0,002891626	4,0482764	26,5530636	102,190445	670,2776975
38,98472	935,63	1118609	0,002237218	3,1321052	29,6851688	79,06357976	749,3412772
40,99097	983,78	1234879	0,002469758	3,4576612	33,14283	87,28157409	836,6228513
45,97917	1103,50	896325	0,00179265	2,50971	35,65254	63,35248789	899,9753392
49,94097	1198,58	769852	0,001539704	2,1555856	37,8081256	54,41334282	954,3886821
54,97778	1319,47	541896	0,001083792	1,5173088	39,3254344	38,3013525	992,6900345
59,58333	1430,00	302189	0,000604378	0,8461292	40,1715636	21,35879839	1014,048833
63,58333	1526,00	298963	0,000597926	0,8370964	41,00866	21,13078385	1035,179617
67,58333	1622,00	163658	0,000327316	0,4582424	41,4669024	11,56739069	1046,747007
74,58333	1790,00	158721	0,000317442	0,4444188	41,9113212	11,21844223	1057,96545
80,58333	1934,00	123698	0,000247396	0,3463544	42,2576756	8,743007332	1066,708457
87,58333	2102,00	103689	0,000207378	0,2903292	42,5480048	7,328765924	1074,037223
91,58333	2198,00	83246	0,000166492	0,2330888	42,7810936	5,883849281	1079,921072
94,58333	2270,00	85693	0,000171386	0,2399404	43,021034	6,056803888	1085,977876

Reator 3

TEMPO (DIAS)	TEMPO (HORAS)	ÁREA CH4	nCH4 (MMOL)	nCH4 HEADSPACE (MMOL)	nCH4 ACUMULADO(MMOL)	VOLUME HEADSPACE (mL)	VOLUME ACUMULADO (mL)
4,031944444	96,77	32062	0,000064124		0,448868	0,448868	11,33075317
4,983333333	119,60	60513	0,000121026		0,847182	1,29605	32,71612733
6,977083333	167,45	72654	0,000145308		1,017156	2,313206	58,39214694
7,9625	191,10	46977	0,000093954		0,657678	2,970884	74,99388082
10,99861111	263,97	136357	0,000272714		1,908998	4,879882	123,1826248
12,98680556	311,68	116813	0,000233626		1,635382	6,515264	164,4644934
14,98194444	359,57	112259	0,000224518		1,571626	8,08689	204,1369723
18	432,00	347279	0,000694558		0,9723812	9,0592712	228,6827438
21,00694444	504,17	383807	0,000767614		1,0746596	10,1339308	255,810324
25,00347222	600,08	447951	0,000895902		1,2542628	11,3881936	287,4716191
27,98402778	671,62	620776	0,001241552		1,7381728	13,1263664	331,3482308
32,02569444	768,62	450321	0,000900642		1,2608988	14,3872652	363,1770381
32,97430556	791,38	1692132	0,003384264		4,7379696	19,1252348	482,7773751
33,98472222	815,63	2322894	0,004645788		6,5041032	25,629338	646,9601369
35,00416667	840,10	2248384	0,004496768		6,2954752	31,9248132	805,8765123
37,02777778	888,67	1882415	0,00376483		5,270762	37,1955752	938,926102
38,98472222	935,63	714227	0,001428454		1,9998356	39,1954108	989,4078551
40,99097222	983,78	908198	0,001816396		2,5429544	41,7383652	64,19167467
45,58333333	1094,00	901256	0,001802512		2,5235168	44,261882	63,70101227
49,58333333	1190,00	806289	0,001612578		2,2576092	46,5194912	56,98871961
54,58333333	1310,00	800121	0,001600242		2,2403388	48,75983	56,55276374
59,58333333	1430,00	702158	0,001404316		1,9660424	50,7258724	49,62871301
63,58333333	1526,00	489632	0,000979264		1,3709696	52,096842	34,60731917
67,58333333	1622,00	215766	0,000431532		0,6041448	52,7009868	15,2503979
74,58333333	1790,00	196358	0,000392716		0,5498024	53,2507892	13,87863534
80,58333333	1934,00	153289	0,000306578		0,4292092	53,6799984	10,83450703
87,58333333	2102,00	132586	0,000265172		0,3712408	54,0512392	9,371213521
91,58333333	2198,00	99632	0,000199264		0,2789696	54,3302088	7,042016092
94,58333333	2270,00	94259	0,000188518		0,2639252	54,594134	6,662251032

Reator 4

TEMPO (DIAS)	TEMPO (HORAS)	ÁREA CH4	nCH4 (MMOL)	nCH4 HEADSPACE (MMOL)	nCH4 ACUMULADO(MMOL)	VOLUME HEADSPACE (mL)	VOLUME ACUMULADO (mL)
0,989583333	23,75	90791	0,000181582		0,3268476	0,3268476	8,250598125
3,149305556	75,58	143089	0,000286178		0,5151204	0,841968	13,00315929
5,929861111	142,32	128541	0,000257082		2,313738	3,155706	58,40557619
8,119444444	194,87	261888	0,000523776		4,713984	7,86969	118,9948696
10,07777778	241,87	245822	0,000491644		4,424796	12,294486	111,694911
11,06805556	265,63	242277	0,000484554		4,360986	16,655472	110,0841582
12,05208333	289,25	276086	0,000552172		4,969548	21,62502	125,4460593
12,90277778	309,67	1969622	0,003939244		7,0906392	28,7156592	178,9886617
14,03333333	336,80	2916543	0,005833086		10,4995548	39,215214	265,0397529
16,99166667	407,80	1511815	0,00302363		5,442534	44,657748	137,385622
17,93958333	430,55	1807244	0,003614488		6,5060784	51,1638264	164,2326217
25,04375	601,05	100758	0,000201516		1,813644	52,9774704	45,78172759
30,97361111	743,37	53566	0,000107132		0,1928376	53,170308	4,86779019
35,02291667	840,55	23476	0,000046952		0,0845136	53,2548216	2,133372709
41,05208333	985,25	31720	0,00006344		0,114192	53,3690136	2,882543121
54,01527778	1296,37	18854	0,000037708		0,0678744	53,436888	1,713350189
60,98611111	1463,67	14232	0,000028464		0,0512352	53,4881232	1,29332767

Reator 5

TEMPO (DIAS)	TEMPO (HORAS)	ÁREA CH4	nCH4 (MMOL)	nCH4 HEADSPACE (MMOL)	nCH4 ACUMULADO(MMOL)	VOLUME HEADSPACE (mL)	VOLUME ACUMULADO (mL)
0,994444444	23,87	2053	0,00004106		0,0049272	0,0049272	0,124377071
3,152777778	75,67	56241	0,000112482		0,1349784	0,1399056	3,407253209
5,932638889	142,38	263905	0,00052781		3,16686	3,3067656	79,94089349
8,123611111	194,97	156497	0,003129894		18,779364	22,0861296	474,0465753
10,08263889	241,98	774642	0,015492924		92,957544	115,0436736	2346,522778
11,07291667	265,75	5936155	0,01187231		71,23386	186,2775336	1798,152875
12,05694444	289,37	5756431	0,011512862		69,077172	255,3547056	1743,711705
12,90555556	309,73	5491619	0,010983238		13,1798856	268,5345912	332,6992134
14,03888889	336,93	4489972	0,008979944		10,7759328	279,310524	272,0163494
16,99444444	407,87	3254120	0,00650824		7,809888	287,120412	197,1446243
17,94375	430,65	2825320	0,00656064		6,780768	293,90118	171,166598
25,04722222	601,13	1661241	0,003322482		19,934892	313,836072	503,2155126
30,97916667	743,50	1145165	0,00229033		2,748396	316,584468	69,37762702
35,02777778	840,67	543030	0,00108606		1,303272	317,88774	32,89843193
41,05694444	985,37	625315	0,00125063		1,500756	319,388496	37,88351097
54,01944444	1296,47	392698	0,000785396		0,9424752	320,3309712	23,79085579
60,98958333	1463,75	278569	0,000557138		0,6685656	320,9995368	16,87656904

Reator 6

TEMPO (DIAS)	TEMPO (HORAS)	ÁREA CH4	nCH4 (MMOL)	nCH4 HEADSPACE (MMOL)	nCH4 ACUMULADO(MMOL)	VOLUME HEADSPACE (mL)	VOLUME ACUMULADO (mL)
0,957638889	22,98	2345	0,00000469	0,005628	0,005628	0,142067331	0,142067331
3,115277778	74,77	69217	0,000138434	0,830604	0,830604	20,96689651	21,10896385
5,895833333	141,50	1401981	0,002803962	16,823772	17,660004	424,6816612	445,790625
8,0875	194,10	5969872	0,011939744	71,638464	89,298468	1808,366275	2254,1569
10,04097222	240,98	3871466	0,007742932	46,457592	135,75606	1172,726743	3426,883643
11,03611111	264,87	5196884	0,010393768	62,362608	198,118668	1574,216291	5001,099934
12,02083333	288,50	5525416	0,011050832	66,304992	264,42366	1673,733699	6674,833633
12,86875	308,85	5342520	0,01068504	12,822048	277,245708	323,6663362	6998,49997
14,00138889	336,03	6094522	0,012189044	14,6268528	291,8725608	369,2249363	7367,724906
16,95763889	406,98	3054851	0,006109702	7,3316424	299,2042032	185,0722938	7552,7972
17,90763889	429,78	2292909	0,004585818	5,5029816	304,7071848	138,9114978	7691,708697
24,95763889	598,98	492738	0,000985476	5,912856	310,6200408	149,2579374	7840,966635
30,94166667	742,60	652127	0,001304254	1,5651048	312,1851456	39,50786461	7880,4745
34,99097222	839,78	465599	0,000931198	1,1174376	313,3025832	28,20742318	7908,681923
41,02013889	984,48	254922	0,000509844	0,6118128	313,914396	15,44396086	7924,125884
53,98263889	1295,58	215859	0,000431718	0,5180616	314,4324576	13,07740386	7937,203287
60,95138889	1462,83	198569	0,000397138	0,4765656	314,9090232	12,02992234	7949,23321

Reator 7

TEMPO (DIAS)	TEMPO (HORAS)	ÁREA CH4	nCH4 (MMOL)	nCH4 HEADSPACE (MMOL)	nCH4 ACUMULADO(MMOL)	VOLUME HEADSPACE (mL)	VOLUME ACUMULADO (mL)
0,961805556	23,08	2285	0,00000457	0,005484	0,005484	0,138432346	0,138432346
3,120138889	74,88	42998	0,000085996	0,515976	0,52146	13,02475716	13,16318951
5,901388889	141,63	649412	0,001298824	7,792944	8,314404	196,7169077	209,8800972
8,091666667	194,20	3495344	0,006990688	41,944128	50,258532	1058,79359	1268,673687
10,04583333	241,10	5589854	0,011179708	67,078248	117,33678	1693,252963	2961,926651
11,04166667	265,00	5281542	0,010563084	63,378504	180,715284	1599,860505	4561,787155
12,02569444	288,62	6248599	0,012497198	74,983188	255,698472	1892,79698	6454,584136
12,87291667	308,95	6537585	0,01307517	15,690204	271,388676	396,0670591	6850,651195
14,00694444	336,17	7657641	0,015315282	18,3783384	289,7670144	463,9235055	7314,5747
16,96180556	407,08	3554851	0,007109702	8,5316424	298,2986568	215,3638356	7529,938536
17,95486111	430,92	3244509	0,006489018	7,7868216	306,0854784	196,5623602	7726,500896
24,96180556	599,08	425216	0,000850432	5,102592	311,1880704	128,8044825	7855,305379
30,94652778	742,72	1412127	0,002824254	3,3891048	314,5771752	85,5510082	7940,856387
34,99583333	839,90	755896	0,001511792	1,8141504	316,3913256	45,79451062	7986,650897
41,02430556	984,58	354988	0,000709976	0,8519712	317,2432968	21,50626771	8008,157165
53,9875	1295,70	306874	0,000613748	0,7364976	317,9797944	18,59137322	8026,748538
60,95555556	1462,93	288877	0,000577754	0,6933048	318,6730992	17,50105946	8044,249598