



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**MARIA NAZARÉ CARREIRO SOARES**

**ESTIMATIVA TEÓRICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA  
GERADA NOS MUNICÍPIOS QUE COMPÕEM O CONSÓRCIO PÚBLICO DE  
MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA REGIÃO DOS SERTÕES DE CRATEÚS**

**CRATEÚS-CE**

**2023**

MARIA NAZARÉ CARREIRO SOARES

ESTIMATIVA TEÓRICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA GERADA  
NOS MUNICÍPIOS QUE COMPÕEM O CONSÓRCIO PÚBLICO DE MANEJO DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS DA REGIÃO DOS SERTÕES DE CRATEÚS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Janine Brandão de  
Farias Mesquita.

CRATEÚS-CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S655e Soares, Maria Nazaré Carreiro.

Estimativa teórica do potencial energético da biomassa gerada nos municípios que compõem o consórcio público de manejo de resíduos sólidos da região dos sertões de Crateús / Maria Nazaré Carreiro Soares. – 2023.

53 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Crateús, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita.

1. Resíduos sólidos. 2. LandGEM. 3. Aterro sanitário. 4. Metano. 5. Energia. I. Título.

CDD 628

---

MARIA NAZARÉ CARREIRO SOARES

ESTIMATIVA TEÓRICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA GERADA  
NOS MUNICÍPIOS QUE COMPÕEM O CONSÓRCIO PÚBLICO DE MANEJO DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS DA REGIÃO DOS SERTÕES DE CRATEÚS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovada em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Engenheira Ana Deborah Nunes França (Avaliadora)  
Coordenadora de Limpeza Pública de Sobral, Ceará

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Raimunda Moreira da Franca (Avaliadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Raimunda Carreiro e José Maria.

Aos meus irmãos, Jaime e Janaina.

A meu sobrinho, Enzo Soares.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ser tão bom e misericordioso comigo, em vários momentos dessa caminhada senti teu amor e cuidado, bem como nos momentos de dificuldade e de conquista.

À minha orientadora, Prof. Dra. Janine Mesquita por toda paciência, dedicação e ensinamento durante a graduação e realização deste trabalho, por ser um exemplo de profissional excelente.

Aos meus pais, Raimunda Carreiro e José Maria por acreditarem em mim e refletir a alegria em ver a filha caçula deles se tornando uma Engenheira Ambiental e Sanitarista.

À Amanda Paiva e Dara Dayanna, por sempre estarem do meu lado, mesmo que fisicamente distante, pela amizade e companheirismo.

À Fernanda Moreira e Emanuel Alves, por todos os momentos felizes quando morávamos na mesma casa.

A todos os meus amigos de curso, por contribuírem positivamente na minha formação acadêmica, em especial, José Wellington, Michele Pontes, Celymara Joice, Lucas Carvalho, Marcos Bandeira e Paulo César. Sempre serei grata por tudo de bom que vocês me proporcionaram.

À Assistência Estudantil da UFC do campus de Crateús, por todo auxílio financeiro recebido durante a graduação.

À professora Lisieux Marie por ministrar de forma excelente a disciplina de Projeto de Pesquisa Científica e Tecnológica.

À Prof. Dra. Larissa Granjeiro, por ser uma inspiração profissional na minha vida.

À empresa Acquabrazilis em nome do Thiago Gandini e Barbara Barbanera pela oportunidade de estágio e toda experiência profissional adquirida durante esses últimos meses.

À engenheira Ana Deborah e professora Raimunda Franca por terem aceitado compor a banca avaliadora deste trabalho, pelas correções e sugestões.

A todo o corpo docente da UFC Campus de Crateús, por serem excelentes profissionais e terem contribuído de forma positiva na minha formação acadêmica.

*“Ora, a fé é a certeza daquilo que esperamos e a prova daquilo que não vemos.”*

Hebreus 11:1.

## RESUMO

A gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos é uma das metas da Política Nacional de Resíduos Sólidos Lei N° 12.305/2010 ainda não alcançada em muitas regiões do Brasil. O aumento no descarte de matérias diretamente proporcional ao crescimento populacional, sem uma estrutura apropriada traz sérios problemas ao meio ambiente e a sociedade. No processo de decomposição anaeróbia da biomassa de resíduos há liberação do biogás, composto em sua maioria por metano ( $\text{CH}_4$ ), Gases do Efeito Estufa – GEE que contribuem para o aquecimento global, porém o metano é um gás energético e pode ser aproveitado na geração de energia elétrica. O presente trabalho objetivou estimar teoricamente o potencial energético do somatório de resíduos sólidos urbanos de 8 municípios da região dos Sertões de Crateús. Foi utilizado o *software LandGEM Landfill Gas Emissions Model*, versão 3.02, da Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) para estimar a quantidade de metano gerado nos municípios do Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús que serão depositados em um aterro sanitário hipotético. Considerando uma projeção de 15 anos de adição de resíduos no aterro, estima-se um pico máximo de geração de metano no ano de 2039, apresentando um potencial de 49.052.980 KWh/ano e 4.087.748 KWh/mês. Esses dados mostram que há potencial de geração nos resíduos sólidos do consórcio o que atenderia a necessidade energética de 2.089 até 30.056 residências da região, reduzindo assim a emissão de gases para a atmosfera.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos. *LandGEM*. Biomassa. Aterro sanitário. Metano. Energia.

## ABSTRACT

The efficient management of urban solid waste is one of the goals of the National Policy on Solid Waste Law No. 12,305/2010 not yet achieved in many regions of Brazil. The increase in the disposal of materials directly proportional to population growth, without an appropriate structure, brings serious problems to the environment and society. In the process of anaerobic decomposition of waste biomass, biogas is released, composed mostly of methane (CH<sub>4</sub>), Greenhouse Gases - GHG that contribute to global warming, but methane is an energy gas and can be used in generation of electrical energy. This work aimed to theoretically estimate the energy potential of the sum of urban solid waste from 8 municipalities in the region of Sertões de Crateús. The LandGEM Landfill Gas Emissions Model software, version 3.02, from the American Environmental Protection Agency (EPA) was used to estimate the amount of methane generated in the municipalities of the Public Consortium for Solid Waste Management in the Sertões de Crateús Region that will be deposited in a hypothetical landfill. Considering a 15-year projection of adding waste to the landfill, a maximum peak of methane generation is estimated in the year 2039, with a potential of 49,052,980 KWh/year and 4,087,748 KWh/month. These data show that there is potential to generate solid waste from the consortium, which would meet the energy needs of 2,089 to 30,056 homes in the region, thus reducing the emission of gases into the atmosphere.

**Keywords:** Solid waste. LandGEM. Biomass. Landfill. Methane. Energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização dos municípios que compõem o Consórcio Público de Manejo dos Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús.....	29
Figura 2 - Parâmetros aplicados no software para determinação da geração de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> .....	34
Figura 3 - Ilustração dos dados de período de tempo.....	34
Figura 4 - Ilustração dos gases escolhidos para levantamento de dados.....	34
Figura 5 – Consumo residencial de energia elétrica no estado do Ceará.....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização dos municípios que compõem o Consórcio Público de Manejo dos Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús.....	30
Tabela 2 - Massa total e per capita de resíduos domiciliares gerados por dia nos municípios do CRS Crateús.....	31
Tabela 3- Geração per capita de resíduos baseado na faixa da população urbana.....	32
Tabela 4 – Estimativa de parâmetros K e L <sub>0</sub> por categoria de RSU e precipitação anual.....	33
Tabela 5 – Estimativa da população urbana dos municípios do CRS Crateús.....	38
Tabela 6 – Estimativa total de RSU dos municípios do CRS Crateús.....	41
Tabela 7 – Valores aplicados no <i>LandGEM</i> .....	42
Tabela 8 – Estimativa da produção de metano entre 2024 e 2043.....	43
Tabela 9 – Valores de energia disponível proveniente da biomassa.....	45
Tabela 10 – Custo da energia elétrica no Brasil.....	47
Tabela 11 – Receita gerada com a comercialização da energia gerada no aterro.....	47

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Estimativa populacional dos municípios do CRS Crateús.....	40
Gráfico 2 – Produção de resíduos sólidos urbanos durante 15 anos para o CRS Crateús.....	42
Gráfico 3 – Produção de gases em toneladas por ano no futuro aterro sanitário do CRS Crateús.....	44
Gráfico 4 – Estimativa da geração de energia elétrica (KWh/mês).....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CRS	Consórcio Público de Manejo dos Resíduos Sólidos da Região dos Sertões
Crateús	de Crateús
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informação de Saneamento
GEE	Gases de Efeito Estufa
RCC	Resíduos da Construção Civil

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>17</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 Resíduos sólidos</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2 Aterro sanitário</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3 Consórcio público</b> .....	<b>22</b>
<b>2.4 Biogás e a geração de energia</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5 Modelo de estimativa de geração de biogás em aterros sanitários</b> .....	<b>24</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1 Caracterização da área de estudo</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2 Coleta de dados</b> .....	<b>29</b>
<b>3.3 Caracterização dos resíduos sólidos urbanos dos municípios consorciados</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4 Estimativa da produção de RSU</b> .....	<b>31</b>
<b>3.5 Aplicação do modelo <i>LandGEM</i></b> .....	<b>31</b>
<b>3.6 Estimativa da produção de energia elétrica a partir da conversão do metano e possível aproveitamento energético</b> .....	<b>34</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
<b>4.1 Estimativa do crescimento populacional</b> .....	<b>37</b>
<b>4.2 Potencial da geração de metano em energia elétrica no aterro sanitário</b> .....	<b>41</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>48</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>48</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Durante todo o processo de desenvolvimento humano, a principal fonte de transformação no planeta tem sido a extração de recursos naturais. Em decorrência de mudanças no cenário geopolítico e social brasileiro, maiores são as quantidades de insumos utilizados na produção de bens e produtos. A crescente demanda por esses recursos resulta em subprodutos prejudiciais à vida e ao meio ambiente (VIEIRA e CANDIANI, 2021).

O aumento na geração de resíduos sólidos e na demanda por energia se tornou um problema de interesse global. Dados apurados mostram que o Brasil gerou no ano de 2020 aproximadamente 82,5 milhões de toneladas, ou 225.965 toneladas diárias, sendo assim, cada brasileiro gerou, em média 1,07 kg de resíduo por dia. A região Nordeste representa uma parcela de 24,7% da produção de resíduo sólido urbano (RSU) naquele ano (ABRELPE, 2021).

Os possíveis efeitos negativos da geração de RSU podem ser reduzidos quando se utiliza de aterro sanitário como forma de disposição final ambientalmente correta desses resíduos. Este método permite reduzir consideravelmente o volume da massa de RSU que, de acordo com ABRELPE (2021), a fração orgânica de resíduos no Brasil representa 45,3% de toda a composição gravimétrica. No geral há variações do percentual da matéria orgânica dos resíduos nos estados brasileiros ficando acima de 57% nas regiões mais industrializadas (ZAGO *et al.*, 2019). Essa biomassa quando decomposta libera lixiviados e gases de efeito estufa - GEE.

O biogás produzido pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica disposta em aterro sanitário é composto principalmente por metano e dióxido de carbono. O potencial de aquecimento global do metano é cerca de 20 vezes maior que o dióxido de carbono. Dessa forma, quanto maior a fração de metano, mais potencial energético o biogás possui (FIGUEIREDO, 2011).

O metano de aterro sanitário é um subproduto que pode ser utilizado como fonte alternativa limpa e renovável de energia elétrica. Esse tipo de aproveitamento gera renda para administradores de aterros através da comercialização da energia ou até mesmo o uso no próprio empreendimento (MELLO; GRASSI, 2014).

Neste contexto, esta pesquisa busca investigar se a biomassa dos municípios em estudo possui potencial de aproveitamento energético a partir da transformação do biogás em energia elétrica.

## 1.1 Justificativa

O aproveitamento energético a partir da transformação do biogás em aterros sanitários é considerado uma forma de gerar energia limpa e renovável, solução ambientalmente sustentável para o problema dos resíduos sólidos urbanos. Além disso, contribui para a redução de gases do efeito estufa, contabilizando no cálculo para emissão de crédito de carbono e reduz riscos de explosões de aterros devido às altas concentrações de metano (NEVES, 2018).

Considerando o cenário atual de crise energética no Brasil, integrar fontes alternativas renováveis tem sido objeto de estudo a fim de suprir necessidades energéticas no país, com intuito de minimizar a dependência por combustíveis fósseis, e assim evitar impactos globais pela queima do mesmo (CAVALCANTI, 2020).

O aproveitamento energético a partir da transformação do biogás é uma alternativa relevante do ponto de vista ambiental por contribuir na redução das emissões de Gases do Efeito Estufa – GEE (NEVES, 2018). Nesse sentido, além de melhorar a qualidade do ar e controlar odores na região de influência do aterro sanitário resulta em benefícios para a comunidade e o usuário final de energia (CARVALHO, 2021).

Existem modelos matemáticos que permitem estimar o potencial energético da biomassa para geração de energia. O *LandGEM*, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency*, é um desses modelos que permite verificar a quantidade de gases gerados na decomposição de resíduos sólidos urbanos (EPA, 2005a).

Portanto, projetos de aproveitamento da biomassa de aterros sanitários possibilita reparar e prevenir danos ao meio ambiente e à saúde pública. Além disso, têm relevância econômica na comercialização de energia limpa.

Tendo em vista todos esses aspectos, o trabalho faz uma abordagem teórica sobre o potencial energético dos resíduos sólidos de um futuro aterro sanitário que atenderá os municípios consorciados da Região dos Sertões de Crateús, para posterior aproveitamento

energético, a fim de minimizar impactos ambientais e contribuir com o desenvolvimento sustentável da região.

## **1.2 Objetivos**

### 1.1.1. Objetivo geral

Estimar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos oriundos dos municípios que compõem o Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- a) Estimar o crescimento populacional e de geração de resíduos dos municípios do Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús.
- b) Aplicar o modelo matemático *LandGEM* para estimar a geração de biogás de um aterro sanitário a ser instalado.
- c) Quantificar o potencial de energia elétrica a partir da conversão do biogás gerado no aterro sanitário hipotético.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Resíduos sólidos**

De acordo com a Lei N° 12.305/2010 (Brasil, 2010) que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), entende-se como resíduos sólidos aqueles materiais, substância, objeto ou bem descartado que são resultantes de atividades humanas, cuja destinação final se procede, propõe-se proceder ou está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujo lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água sejam inviáveis, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

O termo “resíduos” é comumente confundido com a definição de rejeitos, geralmente associado a algo inútil. Cabe salientar que resíduo é toda matéria capaz de ser aproveitada, isto é, após o consumo do produto que o deu origem é possível fazer uso para outros fins, enquanto o rejeito não pode ser aproveitado em função das suas características (FERNANDES, 2010).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2021), a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), principalmente os resíduos domiciliares e de limpeza urbana, está associada ao local onde se desenvolve atividades antrópicas, uma vez que o descarte de resíduo é influenciado pela classe social e o consumo de bens e produtos, dentre outras características da população.

#### **2.1.1 Classificação dos RSU**

A classificação dos resíduos sólidos é importante para que haja correto gerenciamento deles, possibilitando decisões assertivas a serem desenvolvidas e executadas.

Existem muitas maneiras de se classificar os resíduos sólidos. As classificações comumente utilizadas são quanto aos potenciais riscos de contaminação do meio ambiente e quanto à natureza ou origem (MONTEIRO, 2001). No Brasil, a classificação mais apresentada é a da NBR 10.004 (ABNT, 2004), que classifica os resíduos sólidos em:

- a) Resíduos classe I – Perigosos: apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- b) Resíduos classe II – Não perigosos: subdividem-se em resíduos classe II A – Não inertes e resíduos classe II B – Inertes;
  - B1) Resíduos classe II A – Não inertes: resíduos que não se adequam nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Podem apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
  - B2) Resíduos classe II B – Inertes: são resíduos que quando amostrados de forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, a temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A PNRS Brasil (2010), classifica os resíduos sólidos quanto a origem em:

- a) Resíduos Domiciliares;
- b) Resíduos de Limpeza Urbana;
- c) Resíduos Sólidos Urbanos: enquadrados nas alíneas “a” e “b”;
- d) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadoras de serviços: os produzidos nessas atividades, com exceção dos citados nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os produzidos nessas atividades, com exceção dos citados na alínea “c”;
- f) Resíduos industriais: os produzidos nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) Resíduos de serviços de saúde: os produzidos nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) Resíduos da construção civil: os produzidos nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) Resíduos agrossilvopastoris: os produzidos nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

k) Resíduos de mineração: os produzidos na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

A forma de classificação depende do local onde os RSU são gerados (urbano ou rural), da composição química (orgânicos ou inorgânicos) e qual atividade humana gerou o resíduo (residencial, comercial, industrial, serviços de saúde, restos de obra e construções, resíduos públicos ou especiais) (VANZIN, 2006).

### 2.1.2 Destinação e disposição final dos RSU

A demanda acelerada por produtos torna inevitável a produção de resíduos, o correto gerenciamento dos RSU evita desperdícios frequentes de matéria. Ações integradas de redução, reutilização e reciclagem podem ser adotadas como forma positiva de gerenciar os recursos naturais. Além disso, o reaproveitamento dentro do ciclo produtivo mostra-se uma prática vantajosa do ponto de vista ambiental (PASSOS, 2019).

A destinação dos resíduos sólidos consiste em utilizá-los para fins de compostagem, reciclagem, incineração ou outras destinações de toda a matéria que compõe o volume de resíduos. Já a disposição final adequada inclui a distribuição de rejeitos em aterros de modo a evitar danos à saúde e meio ambiente (PEDROSO, 2021).

Não há como falar de disposição final dos resíduos sólidos sem falar dos lixões, uma forma inadequada comumente utilizada para dispor os RSU sem nenhum tipo de tratamento, na qual faz-se a descarga sobre o solo suscetível a problemas ambientais ou à saúde pública.

A partir da vigência da Lei N° 12.305 de 2010 (Brasil, 2005), os lixões estão sendo substituídos por aterros controlados, que se caracterizam como um lixão remediado com objetivo de diminuir os impactos ambientais; neste faz-se uso de critérios de engenharia, cobrindo os resíduos com uma camada de material inerte no final de cada jornada de trabalho, mas não há impermeabilização de base para evitar contaminação do lençol freático e não se dispõe de sistema de tratamento do chorume, nem da dispersão de gases (SANTANA, 2016).

Neste contexto, a disposição final dos RSU ambientalmente correta tem sido um dos principais desafios enfrentados pelos grandes e pequenos centros urbanos em todo o planeta, tendendo a agravar-se devido ao aumento na comercialização de bens não duráveis

como os descartáveis, por exemplo, que conseqüentemente expande o volume de resíduos gerados pela população.

A Lei Nº 12.305/2010 em seu Capítulo II, art. 3º e inciso VII sugere “reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes” como sendo formas ambientalmente corretas de destinar os resíduos (BRASIL, 2010). No entanto, para melhor eficiência no reuso dos RSU é necessário compreender toda dinâmica do ciclo de vida do resíduo, desde a sua origem até a sua disposição final (PIMENTEL, 2020).

Uma das maneiras ambientalmente corretas de se destinar os resíduos sólidos é em Aterro Sanitário. Dispondo de critérios de engenharia e normas operacionais, é a maneira mais segura e confiável em relação ao controle da poluição ambiental e proteção à saúde pública (MONTEIRO, 2001).

## **2.2 Aterro sanitário**

Os aterros sanitários são obras de engenharia construídos para evitar possíveis contaminações ao meio ambiente, se projetado de forma correta esse tipo de empreendimento possui capacidade de reaproveitamento dos subprodutos gerados na decomposição da matéria orgânica da massa de resíduos (KIRSTEN *et al.*, 2016).

Para a PNRS Brasil (2010), é a maneira mais adequada de disposição final dos resíduos sólidos de modo a minimizar os impactos socioambientais adversos. É um método para destinação dos resíduos sólidos urbanos sobre terreno natural, através do seu confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo, segundo critérios de engenharia para confinar os resíduos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume possível, de modo a evitar impactos ao meio ambiente, saúde e segurança pública (ABNT, 1992).

De acordo com Landim e Azevedo (2008), dispõe-se os resíduos em camadas sendo elas impermeabilizadas com argila e por fim toda a célula é coberta por uma manta de polietileno. Nesse sentido, a contenção inclui sistemas de tratamento de chorume, drenagem das águas superficiais e coleta e queima do biogás.

O aterro sanitário é um instrumento essencial da gestão municipal no controle de impactos causados principalmente pela degradação da matéria orgânica, por obedecer às

normas técnicas específicas e critérios de engenharia. Porém, para que esses problemas sejam evitados, é necessário não somente a adoção dessas medidas, mas também um conjunto de ações (ICLEI, 2009).

Santana (2016) ressalta que para haver resultados positivos numa gestão eficiente nos aterros sanitários, deve-se existir um sistema de captação e reutilização dos gases gerados, gases estes que contribuem para o efeito estufa.

### **2.3 Consórcio público**

Segundo a Lei Federal 11.107/2005 (Brasil, 2005), que dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências, o consórcio público é formado pela associação pública ou pessoa jurídica de direito privado, cujo objetivos dos consorciados são determinados pelos entes da Federação que se consorciarem, observados os limites constitucionais.

Os consórcios públicos intermunicipais dos estados brasileiros representam uma possibilidade de redução de custos nos projetos de aterros sanitários como forma de disposição final de RSU, compartilhando custos de construção, operação e manutenção (PAVANI, CICERELLI, *et al.*, 2018).

Medeiros (2012) explica que por falta de recursos financeiros, os municípios brasileiros de pequeno porte não possuem condições financeiras para implantar um aterro sanitário que atenda critérios legais. Sendo assim, os consórcios funcionam como uma ferramenta operacional de auxílio a esses municípios em prol de objetivos em comum.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2019, observou-se um percentual de 66,3% dos municípios na procura por consórcios públicos como instrumento de cooperação, tendo um aumento significativo se comparado os anos de 2015 e 2019 (IBGE, 2020).

Dessa forma, levando em consideração as metas estabelecidas pela PNRS é notório maior adesão dos consórcios intermunicipais no país, levando em consideração as demandas econômicas e socioambientais dos municípios brasileiros.

## 2.4 Biogás e a geração de energia

Um aterro sanitário de resíduos sólidos pode ser operado como um reator biológico, onde os resíduos e água são elementos de entrada, gases e chorume são formados como produto da reação. O processo de decomposição da matéria orgânica presente pode ocorrer de duas maneiras: a decomposição aeróbia, geralmente ocorre durante a deposição das camadas de resíduo; e, em seguida, a decomposição anaeróbica, em consequência da queda na quantidade de CO<sub>2</sub> presente nos constituintes, fase predominante de todo o processo (VELÁSQUEZ PIÑAS, 2016).

O biogás de aterro sanitário é resultado da fração de alguns gases constituintes, sendo eles principalmente metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que, juntos, formam aproximadamente 99% de seu total. O restante é composto por pequenas quantidades de monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, ácido sulfídrico e amônia. A geração do biogás baseia-se na decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (ELK, 2007).

Verma (2002) mostra que de forma mais específica o biogás possui a seguinte composição:

- Metano (CH<sub>4</sub>): 55% a 70% por volume;
- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>): 30% a 45% por volume;
- Sulfeto de Hidrogênio: 200 a 4000 ppm.

Já Fernandes (2009) afirma que a composição do biogás é 45% a 60% de metano sendo a porcentagem restante de CO<sub>2</sub>, vapor de água e alguns gases traços.

Os principais agentes decompositores da matéria orgânica dos RSU em condições anaeróbias são bactérias fermentativas, acetogênicas produtoras de H<sub>2</sub>, acetogênicas consumidoras de H<sub>2</sub> e as metonogênicas (FERNANDES, 2009). A decomposição biológica ocorre quando esses organismos quebram a estrutura molecular dos compostos orgânicos presentes, gerando compostos voláteis. A reação química resulta do contato entre o resíduo e os gases reativos gerados no aterro (USEPA, 1991).

Maciel (2009) menciona que, o processo de decomposição anaeróbia dos RSU, de modo geral, acontece em cinco fases:

- I. Fase aeróbia: também chamada de ajuste inicial pode durar algumas horas a semana,

onde o processo biológico vai se estabilizando conforme os resíduos vão sendo depositados e acumulando umidade na massa de resíduos. Nessa fase além de oxigênio livre, há também oxigênio dissolvido na umidade dos resíduos.

- II. Fase de transição: é o período que transcende a fase aeróbia, ao passo que decai a presença de oxigênio ocorre a formação de nitratos e sulfatos. Ao final, a concentração de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> é bem pequena, enquanto CO<sub>2</sub> é produzido de forma acelerada com curta fase de geração do H<sub>2</sub>.
- III. Fase ácida: polímeros mais complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) são divididos em moléculas menores na presença de água (hidrólise) formando aminoácidos, ácidos graxos e açúcares simples. Ainda nessa fase, as bactérias acidogênicas e acetogênicas transformam esses monômeros em compostos mais simples (álcool, ácidos carboxílicos, graxos voláteis e acético). Os gases produzidos no final dessa fase são o CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>, além de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)
- IV. Fase metanogênica: é a mais longa do processo que consiste na geração e estabilização do metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), a partir do que foi produzido na fase anterior.
- V. Fase maturação: a quantidade de nutrientes é restrita e os resíduos passam a bioestabilizar. A concentração de metano e dióxido de carbono decai enquanto que as condições atmosféricas tendem a se estabelecer.

Na visão de Fernandes (2009), o aterro sanitário é uma das principais fontes antropogênicas de emissões de metano. Em seu estudo afirma que para cada tonelada de RSU depositada em aterros tem-se aproximadamente 160 a 250 m<sup>3</sup> de biogás. Sendo assim, uma tonelada de resíduos resulta em aproximadamente 88 a 138 m<sup>3</sup> de metano.

Como visto anteriormente, além do metano, a decomposição da matéria orgânica dos RSU libera outros gases que contribuem para o aquecimento global, classificados como Gases do Efeito Estufa – GEE. Por possuir um alto potencial energético, o metano é o principal gás presente no biogás para fins de aproveitamento (FERNANDES, 2010).

## **2.5 Modelo de estimativa de geração de biogás em aterros sanitários**

Para instalação de um sistema de aproveitamento do biogás em um aterro sanitário se faz necessário análise da quantidade de gases gerados. Nesse sentido, há vários modelos que

podem estimar a produção de biogás, como o Modelo de Geração Biogás (CETESB, 2006), Método de Decaimento de Primeira Ordem (FOD), Modelo Tchobanoglous, Thessen & Vigil, Modelo Multi-fase entre outros, sendo possível desenvolver uma curva de geração que prediz a produção de gás por algum tempo (BIANEK; SCHIRMER; CABRAL; MAYER; EURICH; MARTINS, 2018).

A literatura recomenda emprego de modelos empíricos, fundamentados em equações matemáticas, que simulam de forma teórica a produtividade de biogás em função do tempo. Nesse sentido, critérios devem ser considerados a fim de se chegar a resultados confiáveis. Esses resultados servem não somente para avaliar o potencial de emissões de GEE (gases de efeito estufa) como também a viabilidade de projetos de aproveitamento do biogás (SILVA, 2012).

A produção de gás total e a taxa em que os gases são gerados podem sofrer mudanças diante de cada modelo aplicado, porém a quantidade de resíduos suscetível a decomposição é o parâmetro de entrada mais importante, comum a todos os modelos (FERNANDES, 2009).

### 2.5.1 Modelo *LandGEM*

O *LandGEM* – versão 3.02 (*Landfill Gas Emissions Model* – Modelo de Emissão de Gases em Aterros Sanitários), é um *software* desenvolvido pela EPA em 2005 para estimar a quantidade de biogás gerado em aterros e suas variações ao longo de algum intervalo de tempo. Tal modelo funciona com equação de primeira ordem Equação (1) para estimativa das emissões do gás metano e do dióxido de carbono, como também de outros gases (EPA, 2005a).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 KLo \left( \frac{M_t}{10} \right) e^{-Kt_{i,j}} \quad (1)$$

EPA (2005a) apresenta as variáveis como:

$Q_{CH_4}$  = geração anual de metano no ano do cálculo (m<sup>3</sup>/ano);

$i$  = incremento de tempo de 1 ano;

$n$  = (ano do cálculo) – (ano inicial do cálculo);

$j$  = incremento de tempo de 0,1 ano;

$K$  = taxa de geração de metano;

$L_0$  = capacidade potencial de geração de metano ( $m^3/Mg$ );

$M_t$  = massa de resíduos aceita do  $t$ -ésimo ano  $Mg$ ;

$T_{i,j}$  = idade da  $j$ -ésima seção de massa de resíduo  $M_i$ , aceita no  $i$ -ésimo ano (anos em número decimal, p. ex. 3,2 anos).

Os parâmetros  $L_0$  e  $K$  são os mais relevantes, uma vez que refletem variações conforme o local, clima e tipo de resíduos. O fator  $K$  pode variar de 0,003 a 0,21 por ano (FIGUEIREDO, 2012).

O modelo trata-se de uma planilha na Interface do *Microsoft Office Excel*, onde o usuário insere dados de entrada do projeto, sendo eles: ano de abertura, ano de encerramento ou estimativa final do funcionamento, taxa de recebimento dos resíduos desde o ano de abertura até a data atual, ou desde o ano de abertura até o ano de encerramento (EPA, 2005b).

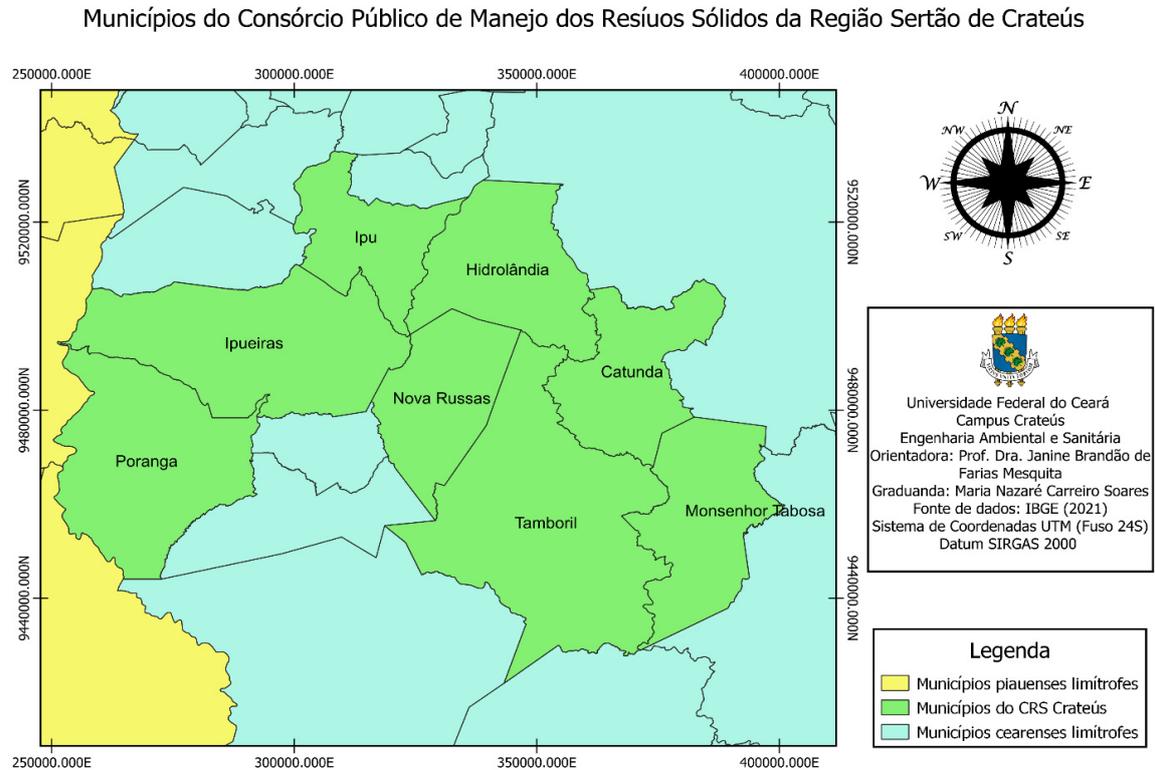
### **3. METODOLOGIA**

Para estimar o potencial energético da biomassa dos resíduos sólidos urbanos dos municípios do Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús, considerou-se um aterro sanitário hipotético que atenderia a esses municípios e adotou-se o ano de 2024 como o de início das atividades do aterro, a estimativa da produção energética foi projetada para um período de 20 anos, considerando 15 anos de adição de resíduos.

#### **3.1 Caracterização da área de estudo**

A área em estudo trata-se da região dos Sertões de Crateús que contempla 8 municípios do estado do Ceará, sendo eles: Ipueiras, Poranga, Ipu, Hidrolândia, Catunda, Tamboril, Nova Russas e Monsenhor Tabosa. Esses municípios compõem o Consórcio Público de Manejo dos Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús (CRS Crateús) aprovado no ano de 2018 com o objetivo de compartilhar solução regional nas políticas pré-aterro, com tecnologias sustentáveis para o tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos (CRSCRATEUS, 2018). A Figura 1 expressa a delimitação política dos municípios da área de estudo.

Figura 1 – Localização dos municípios que compõem o Consórcio Público de Manejo dos Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús.



Fonte: autora (2023).

Os municípios em geral se caracterizam por regimes de precipitações médias anuais baixas apresentando altas temperaturas médias no período do verão. O clima da região é semiárido com temperatura média em torno de 27 °C e pluviosidade próxima a 700 mm (Tabela 1).

A Tabela 1 representa algumas características quantitativas da região. A área total de planejamento é 8.763,8, residindo 192.557 pessoas nessa região. Vale destacar que o aterro sanitário receberá apenas os resíduos sólidos urbanos atendendo assim a parcela da população urbana dos municípios.

Tabela 1 - Caracterização dos municípios que compõem o Consórcio Público de Manejo dos Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús.

Região de Planejamento					
Municípios	Área (km <sup>2</sup> )	População (habitante)	Densidade demográfica (hab/ km <sup>2</sup> )	Temperatura Média (°C)	Pluviosidade (mm)
Ipueiras	1.477,4	37.862	25,63	24° a 26°	932,2
Poranga	1.309,3	12.001	9,17	22° a 24°	1.178,4
Ipu	629,3	40.296	64,03	26° a 28°	903,6
Hidrolândia	966,9	19.325	19,99	26° a 28°	806,6
Catunda	790,7	9.952	12,59	26° a 28°	733,5
Tamboril	1.961,3	25.451	12,98	26° a 28°	685,7
Nova Russas	742,8	30.965	41,69	26° a 28°	840,8
Monsenhor	886,1	16.705	18,85	22° a 24°	646,6
Tabosa					
Total	8.763,8	192.557	-	-	-

Fonte: adaptado de IBGE (2010) e IPECE (2017).

### 3.2 Coleta de dados

Inicialmente, foi necessário obter informações referente à situação dos resíduos sólidos gerados nos municípios consorciados, considerando a parcela de maior significância para a pesquisa, que são os resíduos domiciliares e de limpeza urbana.

Para realização de estudos relevantes é essencial conhecer a composição dos resíduos gerados nas principais atividades da região. Nesse caso, com base em dados do Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Ceará e os Planos de Coletas Seletivas Múltiplas disponibilizados no site da Secretaria do Meio Ambiente do estado do Ceará, foi possível analisar as características dos resíduos coletados nos municípios e identificar quais são as frações mais significantes.

### 3.3 Caracterização dos resíduos sólidos urbanos dos municípios consorciados

Sabe-se que no Brasil há déficits em estudos aprofundados que caracterizem e quantifiquem os resíduos. No estado do Ceará a situação não é diferente. Dessa maneira, a caracterização gravimétrica de referência para essa pesquisa foi realizada com base no diagnóstico do Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Ceará. De acordo com esse documento, toda a região dos Sertões de Crateús apresenta 44% de resíduos orgânicos, 30% de resíduos recicláveis secos e 26% de rejeitos.

Grande parte dos resíduos dos municípios da Região dos Sertões de Crateús é transportada para lixões a céu aberto, em alguns casos, é realizado uma coleta conjunta com outros tipos de resíduos: Resíduos da Construção Civil (RCC), volumosos, resíduos de grandes geradores e resíduos verdes. Sendo assim, até então o controle da massa de resíduos gerada nesses municípios é ineficiente. O cálculo da quantidade gerada é feito com base no número de viagens, tipo de resíduos transportados e capacidade em volume dos veículos (CEARÁ, 2019).

A quantidade gerada de resíduos em cada município do consórcio está apresentada na Tabela 2, com exceção do município de Poranga que não participou do estudo utilizado como referência. Porém, esse déficit não interferiu negativamente nesta pesquisa, uma vez que é apenas uma informação para nortear a escolha da geração per capita de resíduos adotada. Além disso, Poranga apresenta características semelhantes com as da região, entende-se que a geração per capita de resíduos está na média dos demais municípios.

Tabela 2 - Massa total e per capita de resíduos domiciliares gerados por dia nos municípios do CRS Crateús.

<b>Municípios</b>	<b>Resíduos gerados total (t/dia)</b>	<b>Resíduos gerados per capita (kg/hab.dia)</b>	<b>Indicador do SNIS para a população (kg/hab.dia)</b>
Catunda	5,9	1,1	0,90
Hidrolândia	6,8	0,7	0,90
Ipu	42,9	1,5	0,95
Ipueiras	38,5	1,3	0,95
Monsenhor Tabosa	11,7	1,2	0,90
Nova Russas	15,9	0,9	0,95
Tamboril	11,4	0,9	0,90
Poranga	-	-	-

Fonte: adaptado (SEMACE, 2017).

### 3.4 Estimativa da produção de RSU

A estimativa da produção diária de resíduos sólidos urbanos dos municípios consorciados foi realizada considerando um período de 20 anos de vida útil para o aterro sanitário. O cálculo baseia-se na Equação 2, conforme utilizado no trabalho de Santana (2016) e também no trabalho de Passos (2019).

$$Pd = \frac{pop.g.R}{1000} \quad (2)$$

Em que:

$P_d$  = produção diária média de resíduos (kg/dia);  $P_{op}$  = população no determinado ano considerado;  $g$  = geração per capita de resíduo dos municípios (kg/hab.dia) e  $R$  = percentual de resíduos aterrados (%).

A taxa de geração per capita de resíduos das cidades do consórcio adotada foi de 0,8 kg/hab.dia baseado na faixa populacional urbana, considerou-se o somatório da população de todos os municípios do consórcio, esse número indica intervalo populacional entre 30 mil a 500 mil (Tabela 3). A geração per capita apresentada fica próximo ao indicado pelo Sistema Nacional de Informação de Saneamento (Tabela 2) para os municípios.

Tabela 3- Geração per capita de resíduos baseado na faixa da população urbana.

TAMANHO DA CIDADE	POPULAÇÃO URBANA (hab)	GERAÇÃO PER CAPITA (kg/hab.dia)
Pequena	Até 30 mil	0,50
Média	De 30 mil a 500 mil	De 0,50 a 0,80
Grande	De 500 mil a 5 milhões	De 0,80 a 1,00
Megalópole	Acima de 5 milhões	Acima de 1,00

Fonte: adaptado de (MONTEIRO, 2001).

### 3.5 Aplicação do modelo *LandGEM*

A estimativa da geração de biogás foi realizada aplicando o método empírico *software LandGEM* – versão 3.02 (*Landfill Gas Emissions Model*) da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA).

Conforme descrito no capítulo de referencial teórico deste trabalho, a funcionalidade do *LandGEM* baseia-se na equação da taxa de decomposição por meio da cinética de primeira ordem, que de maneira simplificada quantifica as emissões de gases gerados em aterros sanitários a partir da decomposição anaeróbia da parcela orgânica de resíduos. Por ser um modelo de fácil acesso e aplicação é o mais utilizado na literatura podendo empregar dados específicos do local ou dados padrões. Para as condições brasileiras a variável  $K$  pode ser aplicada dentro do intervalo de 0,05 a 0,15 e o fator  $L_0$  variando entre 140 a 190  $m^3/t$  (FIGUEIREDO, 2012).

Um estudo realizado por World Bank (2004) *apud* Lattanzi, Prata Filho e Quelhas (2020) mostra que os parâmetros  $K$  e  $L_0$  podem ser estimados de acordo com algumas condições da região como precipitação e fração orgânica de resíduos recebidos pelo aterro (Tabela 4). Além disso, os dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) mostram que os municípios apresentam precipitação média de 737 mm/ano.

Tabela 4 – Estimativa de parâmetros  $K$  e  $L_0$  por categoria de RSU e precipitação anual.

Categoria de RSU	K (ano <sup>-1</sup> )				L <sub>0</sub>	
	Precipitação (mm/ano)				Mínimo	Máximo
	<250	250-500	500-1000	>1000		
Relativamente inerte	0,01	0,01	0,02	0,02	5	25
Moderadamente compostável	0,02	0,03	0,05	0,06	140	200
Altamente compostável	0,03	0,05	0,08	0,09	225	300

Fonte: adaptado de World Bank (2004) *apud* Lattanzi, Prata Filho e Quelhas (2020).

Considerando que os resíduos sejam moderadamente compostáveis e o aterro seja do tipo convencional, o valor de  $L_0$  adotado foi de 170 ( $m^3/Mg$ ), de acordo com Passos (2019) esse parâmetro é indicado para regiões que apresentam precipitação média maior que 635 mm/ano, e para  $K$  de 0,05 ano<sup>-1</sup> (Figura 2).

Figura 2 - Parâmetros aplicados no software para determinação da geração de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

<b>Methane Generation Rate, k (year<sup>-1</sup>)</b>	CAA Conventional - 0.05
<b>Potential Methane Generation Capacity, L<sub>o</sub> (m<sup>3</sup>/Mg)</b>	CAA Conventional - 170
<b>NMOC Concentration (ppmv as hexane)</b>	CAA - 4,000
<b>Methane Content (% by volume)</b>	CAA - 50% by volume

Fonte: EPA (2005).

O *LandGEM* também faz uso de dados que caracterizam a situação investigada, como o tempo que os resíduos orgânicos ficarão dispostos na célula do aterro (Figura 3), a população atendida, a quantidade de resíduos gerado em cada ano e os gases escolhidos para quantificação (Figura 4).

Figura 3 - Ilustração dos dados de período de tempo.

<b>Landfill Open Year</b>	2024	
<b>Landfill Closure Year</b>	2038	
<b>Have Model Calculate Closure Year?</b>	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	
<b>Waste Design Capacity</b>		megagrams

Fonte: EPA (2005).

Figura 4 - Ilustração dos gases escolhidos para levantamento de dados.

<b>Gas / Pollutant #1</b>	Total landfill gas	<p style="color: red; font-size: small;">Default pollutant parameters are currently being used by model.</p> <p><b>Edit Existing or Add New Pollutant Parameters</b></p> <p><b>Restore Default Pollutant Parameters</b></p>
<b>Gas / Pollutant #2</b>	Methane	
<b>Gas / Pollutant #3</b>	Carbon dioxide	
<b>Gas / Pollutant #4</b>	NMOC	

Fonte: EPA (2005).

A estimativa da massa de resíduos apresentada no tópico anterior depende da estimativa populacional, a qual foi estimada de acordo com o método dos mínimos quadrados.

O método consiste na utilização de uma curva modelo cuja soma dos quadrados da distância entre os dados e a curva seja a menor possível. O cálculo foi realizado aplicando as variáveis a e b (Equação 3 e 4) na função de uma reta adicionando dados censitários dos anos de 1980, 1991, 2000 e 2010 publicados pelo IBGE.

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4)$$

Em que:

$x_i$  = subtração do ano de população conhecida e ano de referência;  $y_i$  = população conhecida e  $n$  = número de anos com dados censitários.

A partir desses dados foi possível através da Equação 1 identificar a quantidade de metano que serão gerados no aterro sanitário.

### 3.6 Estimativa da produção de energia elétrica a partir da conversão do metano e possível aproveitamento energético

Para estimativa da produção de energia foi utilizado o mesmo fator de conversão aplicado no trabalho de (CARVALHO, 2021). Nesse pensamento, a energia disponível se configura na seguinte equação:

$$E = \frac{Q_x X f}{12} \quad (5)$$

Onde:

E = energia disponível (kWh/mês);

$Q_x$  = vazão de metano ( $m^3$ /ano);

f = fator de conversão (kWh).

Conhecido a quantificação de energia elétrica gerada, a Figura 5 é utilizada como parâmetro no indicativo do número de residências que poderão ser atendidas.

Figura 5 – Consumo residencial de energia elétrica no estado do Ceará.

Brasil	2016	2017	2018	2019	2020	$\Delta\%$ (2020/2019)	Part. % (2020)	
<b>Consumo (GWh)</b>	<b>11.914</b>	<b>11.424</b>	<b>11.265</b>	<b>12.280</b>	<b>11.948</b>	<b>-2,7</b>	<b>100,0</b>	<b>Consumption (GWh)</b>
Residencial	4.129	4.075	4.335	4.586	4.884	6,5	40,9	Residential
Industrial	2.698	2.383	2.321	2.504	2.205	-12,0	18,5	Industrial
Comercial	2.318	2.260	1.931	2.409	2.111	-12,4	17,7	Commercial
Rural	1.296	1.205	1.215	1.260	1.263	0,3	10,6	Rural
Poder Público	651	650	634	641	523	-18,4	4,4	Public Sector
Iluminação Pública	497	526	489	517	571	10,4	4,8	Public Lighting
Serviço Público	301	301	318	338	367	8,7	3,1	Public Service
Consumo Próprio	24	25	24	24	23	-5,9	0,2	Own Use
<b>Consumidores (unidade)</b>	<b>3.416.986</b>	<b>3.477.473</b>	<b>3.531.583</b>	<b>3.728.764</b>	<b>3.808.096</b>	<b>2,1</b>	<b>100,0</b>	<b>Consumers (units)</b>
Residencial	2.630.687	2.693.590	2.788.825	2.935.298	2.994.418	2,0	78,6	Residential
Industrial	5.949	5.971	5.254	5.814	5.645	-2,9	0,1	Industrial
Comercial	174.418	175.254	166.780	176.696	168.232	-4,8	4,4	Commercial
Rural	558.013	554.899	529.491	561.207	569.432	1,5	15,0	Rural
Poder Público	34.249	33.487	30.576	30.513	46.538	52,5	1,2	Public Sector
Iluminação Pública	10.370	10.603	6.982	11.036	12.292	11,4	0,3	Public Lighting
Serviço Público	2.899	3.279	3.674	7.894	11.224	42,2	0,3	Public Service
Consumo Próprio	401	390	1	306	315	2,9	0,0	Own Use

Fonte: EPE (2021).

Dessa forma, considerando o último ano como referência, o consumo mensal no estado do Ceará e número de residências atendidas com a energia do aterro será, respectivamente:

$$Cr \frac{\left(\frac{Er}{Rr}\right)}{12} \quad (6)$$

$$Ra \frac{E}{Cr} \quad (7)$$

Em que:

Cr = consumo de referência (KWh/mês);

Er = energia de referência (KWh);

Rr = residências de referência;

Ra = residências atendidas;

E = energia disponível (kWh/mês).

A análise da receita para possível comercialização da energia gerada no aterro sanitário, foi usado como referência o valor projetado pela empresa de pesquisa energética EPE no ano de 2017, onde cada kWh de energia equivalem R\$ 0,157 estimado para o ano de 2026. Esse valor foi aplicado para os demais anos. A Equação 8 mostra de forma simplificada essa aplicação.

$$R = V X E \quad (8)$$

Onde:

R = receita gerada (R\$/mês);

V = valor da energia (R\$ 0,157);

E = energia disponível (kWh/mês).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio dos conhecimentos adquiridos na literatura e na aplicação da metodologia descrita, pode-se construir uma base de dados para a questão investigada nesta pesquisa.

### 4.1 Estimativa do crescimento populacional

A estimativa populacional urbana dos municípios consorciados foi realizada com base no método dos mínimos quadrados utilizando um horizonte de projeto de 15 anos, que pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5 – Estimativa da população urbana dos municípios do CRS Crateús.

(Continua)

POPULAÇÃO URBANA (hab)									OBSERVAÇÃO
ANO	Ipueiras	Poranga	Ipu	Hidrolândia	Catunda	Tamboril	Nova Russas	Monsenhor Tabosa	
1970	6752	2120	11315	3031	-	3382	11003	2959	
1980	8629	2968	15328	4649	-	5515	16609	4123	Censos Demográficos do IBGE
1991	12931	4486	17736	6763		8533	20526	5652	
2000	15775	7135	22404	9122	4068	12401	20844	7823	
2010	18358	7798	25581	11054	5395	14202	23244	9362	
2024	23248	9813	30491	14150	7253	18834	26242	11916	
2025	23572	9966	30847	14367	7386	19136	26449	12096	
2026	23896	10118	31203	14585	7518	19437	26655	12276	
2027	24221	10271	31559	14802	7651	19739	26862	12456	Projeção com base no Método dos Mínimos Quadrados
2028	24545	10423	31915	15020	7784	20040	27068	12636	
2029	24869	10576	32270	15237	7916	20342	27275	12816	

Fonte: autora (2023).

Tabela 5 – Estimativa da população urbana dos municípios do CRS Crateús.

(Conclusão)

<b>2030</b>	25194	10728	32626	15455	8049	20644	27481	12996
<b>2031</b>	25518	10880	32982	15672	8182	20945	27688	13176
<b>2032</b>	25842	11033	33338	15890	8314	21247	27894	13356
<b>2033</b>	26167	11185	33694	16107	8447	21549	28101	13536
<b>2034</b>	26491	11338	34049	16325	8580	21850	28307	13716
<b>2035</b>	26815	11490	34405	16542	8713	22152	28514	13896
<b>2036</b>	27140	11643	34761	16760	8845	22453	28720	14076
<b>2037</b>	27464	11795	35117	16977	8978	22755	28927	14256
<b>2038</b>	27788	11947	35473	17195	9111	23057	29133	14436

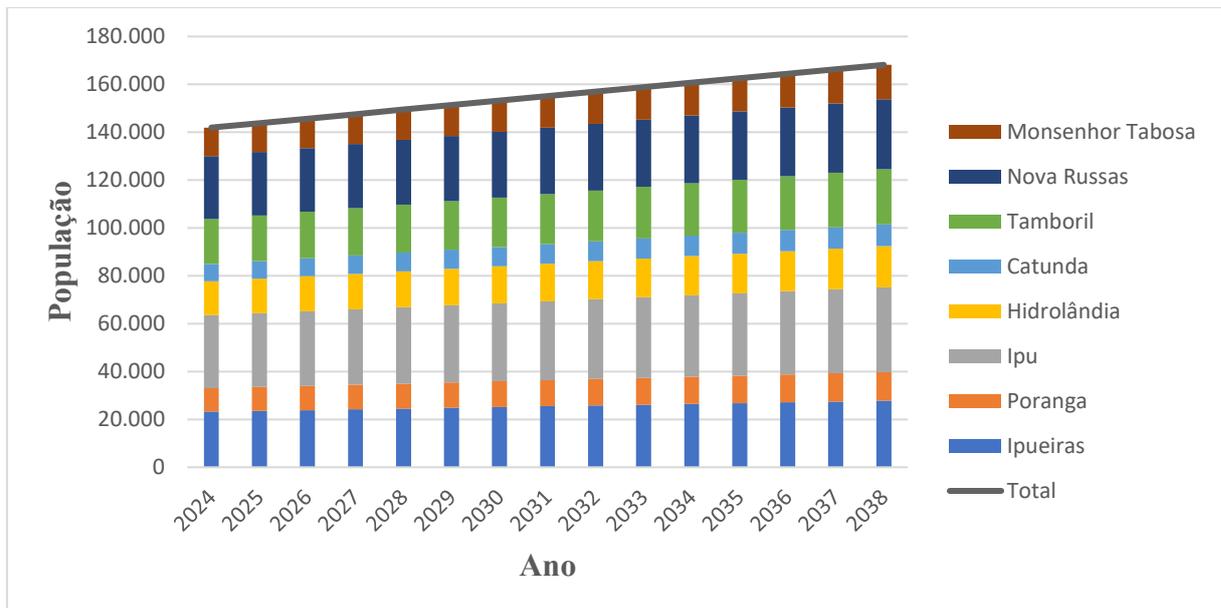
Fonte: autora (2023).

Os cálculos foram efetuados por uma planilha no Excel a partir da adição de dados dos censos demográficos dos anos de 1980, 1991, 2000 e 2010 disponibilizados pelo IBGE. Observando os dados, percebe-se que as cidades mais populosas são Ipu, Nova Russas e Ipueiras, estima-se atingir até 35.473, 29.133, 27.788 pessoas respectivamente nessas cidades no ano de 2038.

O objetivo da estimativa populacional da parcela de pessoas residentes na zona urbana dos municípios deste estudo é entender a tendência de crescimento e usar os números como referência para estimar a quantidade de resíduos sólidos que serão adicionados em um aterro sanitário teórico, considerando que esses RUS gerados nos municípios irão para o aterro.

O crescimento populacional resultante (Gráfico 1) se comporta de modo linear, de crescimento quase homogênea totalizando um número de pessoas acima de 160 mil no último ano de aterramento de resíduos, esse valor é equivalente à população de uma cidade de tamanho médio que produz significativa quantia de resíduos sólidos.

Gráfico 1 – Estimativa populacional dos municípios do CRS Crateús.



Fonte: autora (2023).

A estimativa populacional considerou que o suposto aterro tenha abertura no ano de 2024, até o ano de 2043, período em que se encerrariam as atividades na célula. Ao obter esses dados pode-se avaliar o crescimento populacional das cidades consorciadas e também a geração de RSU durante esses anos. Além disso, também foi possível analisar o potencial de geração de biogás, o que pode viabilizar a implantação de um sistema de aproveitamento energético a partir da biomassa dos resíduos das cidades do consórcio.

O cálculo da quantidade de resíduos sólidos urbanos que irão para o aterro sanitário hipotético foi estimado considerando o somatório dos dados demográficos obtidos através da projeção populacional e a geração per capita de RSU adotada. Admitindo que o percentual de resíduos aterrados seja de 100%, a previsão é de que o empreendimento adicione resíduos durante 15 anos, dando início no ano de 2024 até o ano de 2038. Os valores estimados de RSU gerados podem ser observados na Tabela 6. Importante destacar que o ano de encerramento para o aterro sanitário é somente uma previsão, na prática essa data pode se estender para posteriormente, depende de fatores operacionais no aterro.

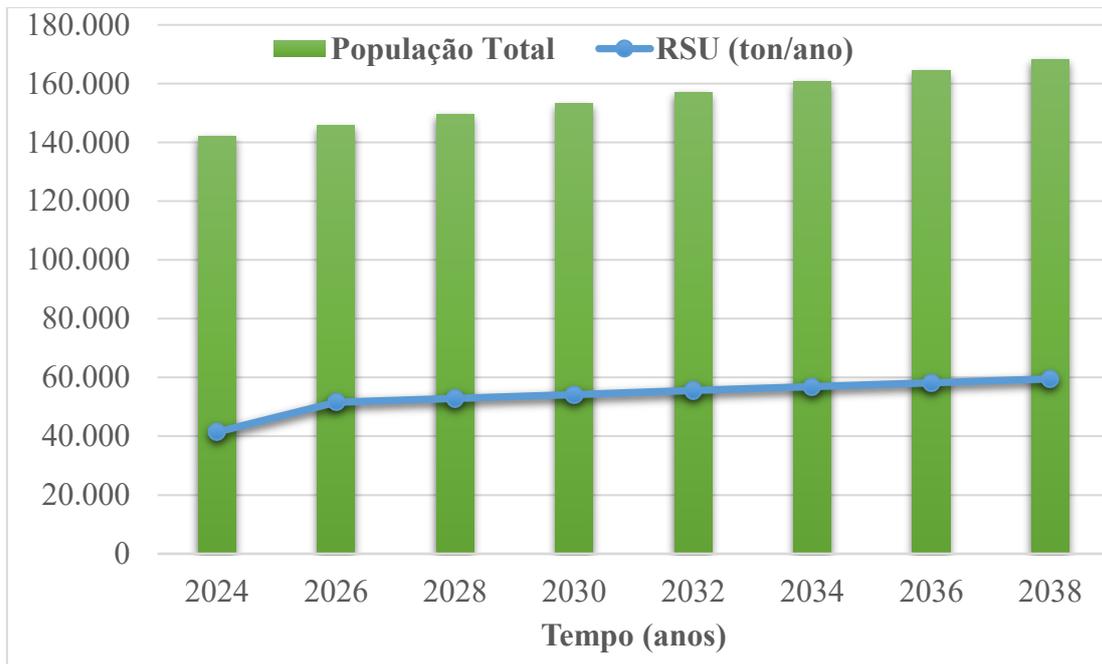
Tabela 6 – Estimativa total de RSU dos municípios do CRS Crateús.

<b>ANO</b>	<b>POPULAÇÃO TOTAL (hab)</b>	<b>GERAÇÃO DE RSU (ton/ano)</b>
2024	141948	41449
2025	143819	50919
2026	145689	51581
2027	147560	52244
2028	149431	52906
2029	151302	53568
2030	153173	54231
2031	155044	54893
2032	156915	55556
2033	158786	56218
2034	160657	56881
2035	162527	57543
2036	164398	58205
2037	166269	58868
2038	168140	59530

Fonte: autora (2023).

Através do Gráfico 2 percebe-se que o aumento de resíduos sólidos está relacionado ao crescimento populacional dando um salto maior nos três anos iniciais. No último ano da projeção tem-se uma produção de quase 60.000 toneladas por ano de RSU. Importante destacar que esses valores estão sujeitos a variações devido fatores como ações de educação ambiental, consumismo e hábitos por parte da população.

Gráfico 2 – Produção de resíduos sólidos urbanos durante 15 anos para o CRS Crateús.



Fonte: autora (2023).

#### 4.2 Potencial da geração de metano em energia elétrica no aterro sanitário

Conforme sugere a literatura, descrita no capítulo de metodologia, o cálculo da quantidade de metano gerado, usando o *LandGEM* foi considerado as variáveis de valores padrões do modelo, Tabela 7:

Tabela 7 – Valores aplicados no *LandGEM*.

Variáveis	Valores
Taxa de geração de metano (k)	0,05 ano <sup>-1</sup>
Capacidade potencial de geração de metano (L0)	170 m <sup>3</sup> /Mg
Concentração de NMOC	4,00 ppmv as hexane
Teor de metano	50%

Fonte: adaptado de EPA, 2005b.

A Tabela 8 mostra a projeção da produção de metano alcançada com a aplicação do *software LandGEM* durante o tempo de operação do aterro teórico (15 anos) e após finalizar as atividades, até o ano de 2043.

Tabela 8 – Estimativa da produção de metano entre 2024 e 2043.

Ano	Emissões de Metano (m <sup>3</sup> /ano)
2024	-
2025	344.513
2026	750.937
2027	1.143.041
2028	1.521.533
2029	1.887.068
2030	2.240.278
2031	2.581.773
2032	2.912.115
2033	3.231.856
2034	3.541.506
2035	3.841.565
2036	4.132.493
2037	4.414.733
2038	4.688.720
2039	4.954.847
2040	4.713.196
2041	4.483.331
2042	4.264.676
2043	4.056.685

Fonte: autora (2023).

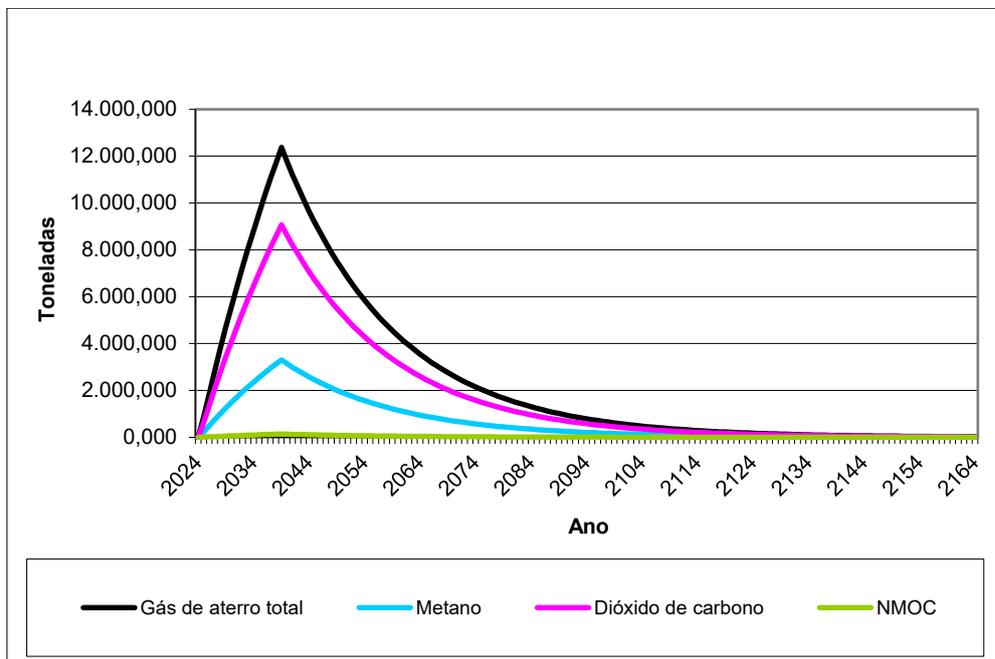
A produção do biogás varia com a idade da biomassa dos resíduos, quando depositada de forma contínua retratam um maior potencial de geração de metano do que aqueles que estão armazenados e confinados a mais tempo, conforme mostra a pesquisa.

A geração significativa de gases no aterro se inicia após um intervalo de tempo da deposição de resíduo. No ano de 2024, ano de início das atividades ainda não há produção, percebe-se a formação do biogás a partir de 2025, com uma geração estimada de 344.513 m<sup>3</sup>/ano de metano.

Ao observar os dados, nota-se que o desempenho da geração de metano se comporta de forma crescente enquanto há deposição de resíduos, isso porque aumenta-se o potencial gerador a cada quantidade de resíduos adicionada, considerando que o fator de conversão da matéria orgânica em metano seja de 50%.

O resultado da aplicação do modelo *LandGEM* apresenta a quantidade total de biogás gerado, tendo maior número nos anos finais da adição de matéria, devido os resíduos mais antigos estar em fase final do processo de decomposição anaeróbia. Com base no Gráfico 3, verifica-se que, em 2039 a curva atinge seu ponto máximo indicando o período de maior produção de metano e dióxido de carbono proveniente da biomassa de resíduos depositados. Nos anos seguintes, os valores começam a diminuir visto que não há mais recebimento de matéria orgânica para potencializar o sistema.

Gráfico 3 – Produção de gases em toneladas por ano no futuro aterro sanitário do CRS Crateús.



Fonte: autora (2023).

O aproveitamento do biogás é possível devido a sua composição ser rica em metano que, em condições normais de temperatura 0°C e pressão 1 atm, dispõe um poder calorífico inferior de 9,9 KWh/m<sup>3</sup> (BMELV, 2010 *Apud* CARVALHO, 2021). De acordo com essa informação, usando o fator de transformação 1 m<sup>3</sup> = 9,9 KWh, encontrou-se os seguintes valores de energia disponível, Tabelas 9:

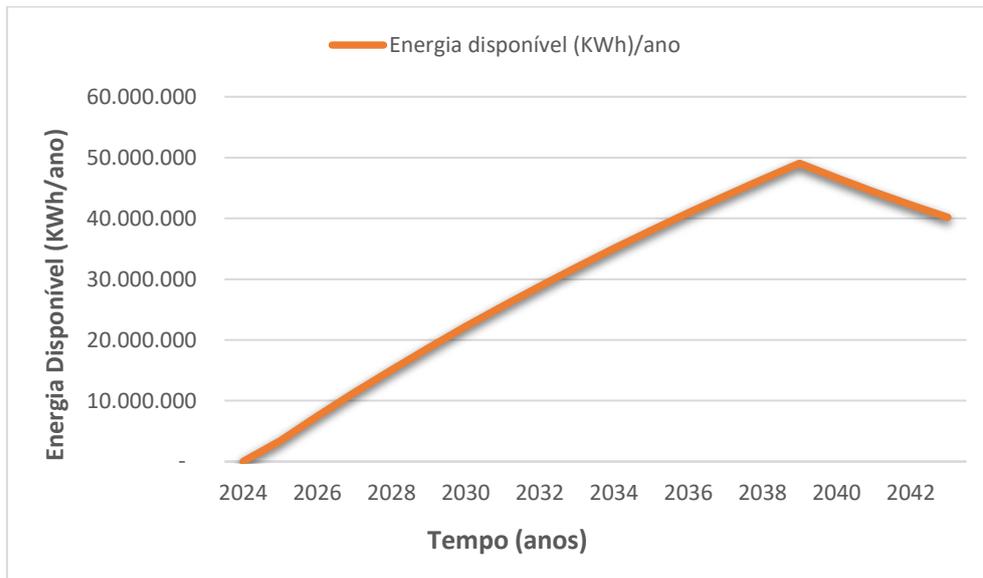
Tabela 9 – Valores de energia disponível proveniente da biomassa.

<b>Ano</b>	<b>Energia Disponível (KWh)/ano</b>	<b>Energia Disponível (KWh)/mês</b>
2024	-	-
2025	3.410.683	284.224
2026	7.434.276	619.523
2027	11.316.109	943.009
2028	15.063.179	1.255.265
2029	18.681.975	1.556.831
2030	22.178.754	1.848.230
2031	25.559.550	2.129.962
2032	28.829.935	2.402.495
2033	31.995.377	2.666.281
2034	35.060.913	2.921.743
2035	38.031.496	3.169.291
2036	40.911.676	3.409.306
2037	43.705.861	3.642.155
2038	46.418.328	3.868.194
2039	49.052.980	4.087.748
2040	46.660.638	3.888.387
2041	44.384.972	3.698.748
2042	42.220.292	3.518.358
2043	40.161.184	3.346.765

Fonte: autora (2023).

Os valores de energia disponível seguem o mesmo comportamento da produção de metano. O Gráfico 4, expõe o ponto máximo de energia no ano de 2039. Em 2040 os valores começam a decair, visto que o biogás gerado a partir de então seria restritamente regido pela taxa de produção de metano provida da biomassa remanescente.

Gráfico 5 – Estimativa da geração de energia elétrica (KWh/mês).



Fonte: autora (2023).

Segundo o Anuário Estatístico de Energia de 2021, elaborado pela empresa de pesquisa energética (EPE), o estado do Ceará consome cerca de  $4,884 \times 10^9$  KWh, correspondente a um total de 2.994.418 residências. A partir dessas informações, chega-se à conclusão que se consome em média por residência cerca de 1631 KWh/ano ou 136 KWh/mês. Dessa forma, o potencial de geração de energia elétrica oriundo da biomassa dos municípios do consorcio, logo no segundo ano de operação do sistema hipotético de aproveitamento energético é equivalente a 28.4224 KWh/mês, o que abasteceria 2.089 residências no final de 2025.

Como já apresentado, o ano de 2039 é o que persiste uma maior quantidade de metano, sendo assim tem-se a geração de 4.087.748 KWh/mês, o que supriria a necessidade energética de 30.056 residências.

Importante destacar que uma parcela da energia útil produzida a partir da biomassa dos resíduos sólidos urbanos pode ser utilizada na operação e manutenção do próprio aterro ou vendida para empresas que tenham interesse no uso de energias limpas.

Para análise de receita, a EPE (2017), em sua nota técnica DEA 001/017, projetou uma demanda energética de 2017 a 2026. Usando essa projeção como referência, a Tabela 10 apresenta os preços para fins comerciais do KWh da energia elétrica em reais.

Tabela 10 – Custo da energia elétrica no Brasil.

<b>Ano</b>	<b>Intensidade (KWh/R\$)</b>
2016	0,139
2021	0,149
2022	0,150
2026	0,157

Fonte: adaptado de EPE, 2017.

Tomando como base o valor de R\$ 0,157 para cada KWh de energia disponível, é possível estimar o valor comercial da energia produzida a partir do metano proveniente da biomassa dos resíduos durante o período de vida útil do aterro sanitário hipotético. A Tabela 11 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 11 – Receita gerada com a comercialização da energia gerada no aterro.

(Continua)

<b>Ano</b>	<b>Potencial (KWh)/ano</b>	<b>Receita anual</b>	<b>Potencial (KWh)/mês</b>	<b>Receita mensal</b>
2024	0,00	R\$ -	0,00	R\$ -
2025	616919,38	R\$ 96.856,34	50705,70	R\$ 7.960,80
2026	1344701,00	R\$ 211.118,06	110523,37	R\$ 17.352,17
2027	2046841,38	R\$ 321.354,10	168233,54	R\$ 26.412,67
2028	2724605,94	R\$ 427.763,13	223940,21	R\$ 35.158,61
2029	3379168,64	R\$ 530.529,48	277739,89	R\$ 43.605,16
2030	4011661,00	R\$ 629.830,78	329725,56	R\$ 51.766,91
2031	4623174,33	R\$ 725.838,37	379986,93	R\$ 59.657,95
2032	5214716,88	R\$ 818.710,55	428606,87	R\$ 67.291,28
2033	5787277,54	R\$ 908.602,57	475666,65	R\$ 74.679,66
2034	6341767,17	R\$ 995.657,45	521241,14	R\$ 81.834,86
2035	6879082,00	R\$ 1.080.015,87	565404,00	R\$ 88.768,43
2036	7400044,76	R\$ 1.161.807,03	608222,86	R\$ 95.490,99
2037	7905452,96	R\$ 1.241.156,11	649763,26	R\$ 102.012,83
2038	8396080,07	R\$ 1.318.184,57	690088,77	R\$ 108.343,94

Fonte: autora (2023).

Tabela 11 – Receita gerada com a comercialização da energia gerada no aterro.

(Conclusão)

2039	8872632,10	R\$ 1.393.003,24	729257,43	R\$ 114.493,42
2040	8439908,74	R\$ 1.325.065,67	693691,13	R\$ 108.909,51
2041	8028289,54	R\$ 1.260.441,46	659859,41	R\$ 103.597,93
2042	7636745,23	R\$ 1.198.969,00	627677,69	R\$ 98.545,40
2043	7264296,77	R\$ 1.140.494,59	597065,49	R\$ 93.739,28

Fonte: autora (2023).

A presente pesquisa confirmou o potencial energético da biomassa gerada nos municípios do Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús, e motiva a implantação de projetos semelhantes, com o objetivo de aproveitar a energia produzida através do biogás, já que é uma fonte limpa e contínua.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o potencial energético da biomassa gerada nos municípios do Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús. Por meio dos dados investigados sobre os resíduos da região, foi possível estimar o crescimento populacional urbano dos municípios e a estimativa da produção total de resíduos sólidos que seriam adicionados a cada ano em um aterro sanitário hipotético.

Os resultados encontrados na aplicação do *LandGEM* expressaram valores relevantes para o potencial energético do metano gerado através da biomassa de resíduos, sendo possível fornecer energia para 2.089 até 30.056 residências, suficiente para abastecer pelo menos duas cidades de pequeno porte da região.

Sabe-se que o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos no Brasil ainda tem sido um objetivo a ser alcançado em muitas regiões do país, mesmo após 13 anos do sancionamento da PNRS. Sendo assim, implantar programas de gestão focando o desenvolvimento sustentável é essencial para que uma sociedade cresça sem comprometer a capacidade de atender as necessidades futuras. Para a região de estudo é importante haver uma reestruturação das políticas ambientais municipais, trabalhando de forma conjunta a fim de implantar uma forma adequada de destinação dos resíduos, no caso um aterro sanitário como incentiva esta pesquisa.

Além dos benefícios econômicos, o aproveitamento energético do biogás de aterro contribui na redução dos GEE na atmosfera e também no controle dos fortes odores na região de influência melhorando a qualidade do ar.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise gravimétrica de resíduos sólidos urbanos dos municípios que compõem o Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús.
- Projeto de aterro sanitário de médio porte para os municípios do Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos da Região dos Sertões de Crateús.
- Avaliação dos principais impactos causados pelos lixões da região dos Sertões de Crateús (estudo de caso).

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2021**. São Paulo, 2020. 16-17p. AGÊNCIA DE PROTEÇÃO DO MEIO AMBIENTE DOS ESTADOS UNIDOS (USEPA). **Emissões de ar de Aterros de Resíduos Sólidos Municipais - Informações Fundamentais para Proposta Normas e Diretrizes. Divisão de Padrões de Emissão**. 1991
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro: BNDS, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. 1 ed. Rio de Janeiro, 1992. 7 p.
- BIANEK, Julia; SCHIRMER, Waldir Nagel; CABRAL, Alexandre Rodrigues; MAYER, Cléverson Luiz Dias; EURICH, Pedro Henrique Mildemberger; MARTINS, Eduardo Henrique. **COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS USEPA E IPCC PARA ESTIMATIVA TEÓRICA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO MUNICIPAL**. *Biofix: Scientific Journal*. Irati, p. 34-40. 1 jan. 2018.
- BRASIL. Congresso Nacional – **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos)**. Brasília, DF. 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)> Acesso em: 12/12/2022.
- BRASIL. Lei Nº 11.107, de 6 de abril de 2005. **Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências**. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/lei/111107.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/111107.htm)>. Acesso em: 03 janeiro, 2023.
- C. D. P. E. G. D. M. A. **Relatório 8 - Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: Sertão de Crateús**. Conselho de Políticas e Gestão de Meio Ambiente. [S.l.], p. 36. 2012.
- CARVALHO, Maria Elainy Bernardino. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA DISPOSTA EM LIXÕES DO SEMIÁRIDO CEARENSE**. 2021. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2021.
- CAVALCANTI, Ingrid Lélis Ricarte. **PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE BRIQUETES A PARTIR DO RESÍDUO DA PODA DE ESPÉCIES ARBÓREAS DE JOÃO PESSOA**. 2020. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Pb, p. 15-17, 2020.
- CRSCRATEUS. **CONSÓRCIO PÚBLICO DE MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA REGIÃO DOS SERTÕES DE CRATEÚS. CONSÓRCIO PÚBLICO DE MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA REGIÃO DOS SERTÕES DE CRATEÚS**, 2018. Disponível em: <<https://crscrateus.ce.gov.br/>>. Acesso em: 26 abril 2023.

ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final**. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo aplicado a resíduos sólidos. Rio de Janeiro, IBAM, 2007. Disponível em: [http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/03-aterro\\_md1\\_1.pdf](http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/03-aterro_md1_1.pdf). Acesso em 05 janeiro 2023.

EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. (2005a). **Parâmetros do modelo de geração de gás cinético de primeira ordem para aterros úmidos** (EPA-600/R-05/072). Washington, 2005.

EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. (2005b). **Modelo de Emissões de Gás de Aterro (LandGEM)** Version 3.02 User's Guide, EPA-600/R-05/047. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnca1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>. Acesso em: 10 janeiro 2023.

EPE – Empresa De Pesquisa Energética. SÉRIE ESTUDOS DA DEMANDA. NOTA TÉCNICA DEA 001/17. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos** (2017-2026). Rio de Janeiro, 2017.

FERNANDES, J. G. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental**. Escola de engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, UFGM, Belo Horizonte, 2009.

FERNANDES, Luiz Flávio Reis. **Determinação do Balanço Energético e de Gases do Efeito Estufa (GEE) em função do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**. 2010. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

FIGUEIREDO, Juliana Carvalho. **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. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/LGSA-96NQGK/1/dissertacao\\_julianacarvalhofigueiredo.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/LGSA-96NQGK/1/dissertacao_julianacarvalhofigueiredo.pdf). Acesso em: 10 janeiro 2023.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Vérdi de. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica - estudo de caso**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energias, Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

IBGE, I. B. (3 de Dezembro de 2020). Fonte: Confederação Nacional de Municípios: <https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/pesquisa-do-ibge-destaca-aumento-dos-consorcios-publicos-nos-municipios>.

ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual do Aproveitamento do Biogás: Volume um, Aterros Sanitários**. Secretariado para a América Latina e Caribe, Escritório de Projetos no Brasil: São Paulo, 2009. Disponível em: [http://www.resol.com.br/cartilha12/manual\\_iclei\\_brazil.pdf](http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf) . Acesso em: 25 março 2023.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2010**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/crateus.html>. Acesso em: 20 março 2023.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018a). **Perfil Municipal 2017 Catunda**. Fortaleza, Ceará, 2017.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018b). **Perfil Municipal 2017 Hidrolândia**. Fortaleza, Ceará, 2017.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018c). **Perfil Municipal 2017 Ipu**. Fortaleza, Ceará, 2017.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018d). **Perfil Municipal 2017 Ipueiras**. Fortaleza, Ceará, 2017.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018e). **Perfil Municipal 2017 Monsenhor Tabosa**. Fortaleza, Ceará, 2017.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018f). **Perfil Municipal 2017 Nova Russas**. Fortaleza, Ceará, 2017.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018g). **Perfil Municipal 2017 Poranga**. Fortaleza, Ceará, 2017.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2018h). **Perfil Municipal 2017 Tamboril**. Fortaleza, Ceará, 2017.
- KIRSTEN, Douglas Schreiner *et al.* **ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO ATERRO SANITÁRIO DE OSÓRIO**. Rio Grande do Sul: Moeducitec, 2016. 4 p.
- LANDIM, A. L. P. F.; AZEVEDO, L. P. de. **O Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários: Unindo o Útil ao Agradável**. BNDES: Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2433>. Acesso em: 23 janeiro 2023.
- LATTANZI, Iasmim Esteves; PRATA FILHO, Dario de Andrade; QUELHAS, Osvaldo Luiz Gonçalves. **Modelagem da geração de biogás aplicando metodologia CDM para redução de emissões de gases de efeito estufa: estudo de caso do aterro mtr santa maria madalena, rj, brasil**. *Sistemas & Gestão*, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 483-491, 20 jan. 2020. Laikos Servicos Ltda. <http://dx.doi.org/10.20985/1980-5160.2019.v14n4.1596>.
- MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009. Disponível em: [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5213/1/arquivo2422\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5213/1/arquivo2422_1.pdf). Acesso em: 23 janeiro 2023.
- MEDEIROS, José Humberto Dantas de. **Gestão dos Resíduos Sólidos para Municípios de Pequeno e Médio Porte à Luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2012. 65 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFRSA, Angicos, 2012.

MELLO, Andrielle Rimoldi; GRASSI, Renato. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE FRANCISCO BELTRÃO – PR.** 2014. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2014.

Modelo de Emissões de Gás de Aterro (*LandGEM*) Versão 3.02 guia do usuário. Morrisville, NC, 2005. Disponível em: <https://www.epa.gov/technical-air-pollution-resources#software>  
Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

MONTEIRO, J. H. P.; & ZVEIBIL, V. Z. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, p. 25, 2001. Disponível em:  
<http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>. Acesso em: 23 janeiro 2023.

NEVES, Raphael Iury. **ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM ATERRO SANITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR.** 2018. 33 f. Monografia (Especialização) - Curso de Gestão Ambiental em Municípios, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

PASSOS, Fraíse Moreira. **ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE ARACAJU/SE.** 2019. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.

PAVANI, I. et al. **Alocação de aterro sanitário em consórcio: estratégia para os municípios brasileiros do Estado do Amazonas.** Springer, Dezembro 2018.

PEDROSO, Gabriela Joppert. **ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) DO ATERRO SANITÁRIO NO MUNICÍPIO DE URUSSANGA – SC.** 2021. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Departamento de Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2021.

PIMENTEL, Cristine Helena Limeira et al. **A gestão das rotas tecnológicas de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa/PB/Gestão de rotas tecnológicas para tratamento e destinação final de resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa/PB.** Revista Brasileira de Desenvolvimento v. 6, n. 2, p. 7063-7088, 2020.

**S. PLANO DAS COLETAS SELETIVAS BACIA HIDROGRÁFICA DO ACARAÚ.** Secretário de Meio Ambiente do Estado do Ceará. [S.l.], p. 168. 2017.

SANTANA, Mayco Sullivan Araujo de. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos do Futuro Aterro Sanitário Sediado no Município de Arapiraca/AL.** 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

SILVA, T. R. **Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: estudo de caso do aterro sanitário de ItajubáMG**. 161 fl. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1091>. Acesso em: 27 de janeiro de 2023.

VANZIN, Emerson. **PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: APLICAÇÃO NO ATERRO SANTA TECLA**. 2006. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

VELÁSQUEZ PIÑAS, 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 Estudo de Populações**, Rio de Janeiro, v. 33, p. 175-188, 2016.

VERMA, S. (2002). **Digestão Anaeróbia de Orgânicos Biodegradáveis em Resíduos Sólidos Municipais**. Departamento de Engenharia da Terra e Ambiental, Universidade de Columbia.

VIEIRA, L. C.; CANDIANI, G. Potencial energético de resíduos sólidos. **Revista Ibero Americana**, v. 12, p. 328-342, 24 fev. 2021.

ZAGO, Valéria Cristina Palmeira *et al.* **Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade**. **Scielo Brasil**. Belo Horizonte, p. 222-228. 30 maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019181376>. Acesso em: 21 jul. 2023.