



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JONAS DA SILVA CASTRO

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA REGIÃO DO
VALE DO JAGUARIBE-CE**

RUSSAS

2021

JONAS DA SILVA CASTRO

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA REGIÃO DO VALE
DO JAGUARIBE-CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Me. Daniela Lima Machado da Silva.

RUSSAS

2021

JONAS DA SILVA CASTRO

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA REGIÃO DO VALE
DO JAGUARIBE-CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Me. Daniela Lima Machado da Silva

Aprovada em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Daniela Lima Machado da Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Ramon Rudá Brito Medeiros (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Francisco Gleson dos Santos Moreira (Examinador Externo)
Prefeitura Municipal de Juazeiro do Norte

Me. Jeovana Jisla das Neves Santos (Examinadora Externa)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C351e Castro, Jonas da Silva.
Estimativa do potencial de geração de biogás e de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos na região do Vale do Jaguaribe-CE / Jonas da Silva Castro. – 2021.
64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.
Orientação: Prof. Me. Daniela Lima Machado da Silva.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Biogás. 3. Aterro sanitário. 4. Energia elétrica. I. Título.

CDD 620

A Deus.

Aos meus pais, Ageu e Andréa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida e por me permitir chegar até aqui.

Aos meus pais, por tudo que fizeram por mim. Por nunca terem medido esforços para minha educação. Não há como expressar o meu eterno agradecimento. Sem vocês, nada disso seria possível.

À Karina, pelo companheirismo, compreensão e apoio em diversos instantes dessa trajetória.

À Profa. Ms. Daniela, pelas orientações e direcionamento para desenvolver este trabalho.

Aos meus familiares, em especial Gonzaga e Raquel, pelo incentivo e ajuda nessa graduação.

Aos meus amigos, pelos momentos compartilhados.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

As mudanças nos hábitos de consumo, acompanhadas pelo aumento populacional, intensificam a geração de resíduos sólidos urbanos. A maior parte desses resíduos ainda é destinada para locais inadequados, como os lixões, causando danos socioambientais. Dessa forma, o poder público e a sociedade são fundamentais para modificar este cenário. O processo de decomposição da matéria orgânica libera biogás, constituído principalmente por gás carbônico e metano, sendo esse caracterizado como um gás de efeito estufa. Nesse contexto, os aterros sanitários são uma das opções mais viáveis para a disposição final de resíduos, uma vez que, dentre outros benefícios, possibilita a captação do biogás, que pode ser utilizado como combustível para geração de energia elétrica. Além disso, a disposição final de resíduos sólidos urbanos em lixões pode provocar contaminação do solo e dos recursos hídricos. Nesse estudo, foi elaborada uma estimativa da emissão de biogás dos municípios do Vale do Jaguaribe, de acordo com metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Em seguida, o trabalho mostrou o potencial de geração de energia elétrica a partir desse biogás, tanto da região, quanto dos municípios individualmente, considerando dois cenários distintos. Em vista disso, as cidades de Russas, Limoeiro do Norte e Morada Nova apresentaram os maiores valores de geração. No cenário 1, em que 60% dos resíduos são destinados aos aterros sanitários, o total para todos os componentes do Vale foi de 4.133 MWh/ano em 2025, e 6.275 MWh/ano em 2053. Para o cenário 2, supondo que 100% dos resíduos irão para aterros, foram estimados 6.889 MWh/ano em 2025, e 10.458 MWh/ano em 2053. Portanto, é possível observar que a área apresenta um potencial energético que pode ser destinado para diferentes finalidades, beneficiando a região.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Biogás. Aterro sanitário. Energia elétrica.

ABSTRACT

Changes in consumption habits, accompanied by an increase in population, intensify the generation of solid urban waste. The most of this waste is still destined for inadequate locations, such as dumps, causing socio-environmental damage. Thus, public authorities and society are fundamental to changing this scenario. The decomposition process of organic matter releases biogas, consisting mainly of carbon dioxide and methane, which is characterized as a greenhouse gas. In this context, landfills are one of the most viable options for the final disposal of waste, since, among other benefits, it allows the capture of biogas, which can be used as a fuel for generating electricity. In addition, the final disposal of solid urban waste in landfills can cause contamination of the soil and water resources. In this study, an estimate of the biogas emissions of the municipalities of Vale do Jaguaribe was prepared, according to the methodology proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change. Then, the work showed the potential for generating electricity from this biogas, both in the region and in the municipalities individually, considering two different scenarios. In view of this, the cities of Russas, Limoeiro do Norte and Morada Nova presented the highest generation values. In scenario 1, in which 60% of waste is sent to landfills, the total for all components of the Vale was 4.133 MWh/year in 2025, and 6.275 MWh/year in 2053. For scenario 2, assuming that 100% of the waste will go to landfills, 6.889 MWh/year were estimated in 2025, and 10.458 MWh/year in 2053. Therefore, it is possible to observe that the area has an energy potential that can be destined for different purposes, benefiting the region.

Keywords: Urban solid waste. Biogas. Landfill. Electricity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Execução dos poços de drenagem dos gases	18
Figura 2 - Detalhes dos drenos utilizados.....	19
Figura 3 - Composição do gás (% em volume) nas respectivas fases	22
Figura 4 - Característica do lixiviado em função do tempo	23
Figura 5 - Regiões de planejamento do Estado do Ceará.....	30
Figura 6 - Municípios do Vale do Jaguaribe	31
Figura 7 - Destinação final dos RSU no Ceará - 2015	35
Figura 8 - Destinação final dos RSU na região Nordeste - 2015	35
Figura 9 - Esquema de quarteamento dos resíduos sólidos	37
Figura 10 - Porcentagem de matéria orgânica dos RSU por município	38
Figura 11 - Estimativa da geração de biogás – 2025 – Cenário 1	43
Figura 12 - Estimativa da geração de biogás – 2025 – Cenário 2	44
Figura 13 - Estimativa da geração de biogás – 2053 – Cenário 1	45
Figura 14 - Estimativa da geração de biogás – 2053 – Cenário 2	46
Figura 15 - Potencial de geração de biogás – Cenário 1	47
Figura 16 - Estimativa do total de geração de biogás – Cenário 1	47
Figura 17 - Potencial de geração de biogás – Cenário 2	48
Figura 18 - Estimativa do total de geração de biogás – Cenário 2	48
Figura 19 - Estimativa da geração de energia elétrica – 2025 – Cenário 1	49
Figura 20 - Estimativa da geração de energia elétrica – 2025 – Cenário 2	50
Figura 21 - Estimativa da geração de energia elétrica – 2053 – Cenário 1	51
Figura 22 - Estimativa da geração de energia elétrica – 2053 – Cenário 2	52
Figura 23 - Potencial de geração de energia elétrica – Cenário 1	53
Figura 24 - Estimativa do total gerado de eletricidade – Cenário 1	53
Figura 25 - Potencial de geração de energia elétrica – Cenário 2	54
Figura 26 - Estimativa do total gerado de eletricidade – Cenário 2	54

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Intervalo de duração de cada fase.....	24
Tabela 2 - População e área dos municípios do Vale do Jaguaribe.....	31
Tabela 3 - Distância das cidades até o aterro sanitário mais próximo.....	36
Tabela 4 - Tipologia estimada dos Resíduos Sólidos Urbanos	38
Tabela 5 - Valores considerados nos parâmetros das equações	41
Quadro 1 - Disposição em lixões, coleta seletiva, centro de triagem e estabelecimento	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Políticas públicas de gestão de resíduos sólidos e as projeções populacionais	13
2.2	Aterros sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos	15
2.3	Aproveitamento energético em aterros sanitários	19
2.4	Origem do biogás	20
2.5	Caracterização do biogás	21
2.6	Fases de degradação dos resíduos que culminam na produção do biogás	21
2.7	Fatores que influenciam a geração do biogás de aterro	25
2.8	Estimativa do potencial de emissão de biogás	26
2.9	Estimativa do potencial de geração de energia elétrica	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Descrição do campo experimental	30
3.2	Critérios socioeconômicos	32
3.3	Políticas e iniciativas da gestão de resíduos no Ceará	32
3.4	O panorama no Vale do Jaguaribe	33
3.5	Gravimetria dos resíduos gerados no Vale do Jaguaribe	37
3.6	Projeção populacional	39
3.7	Estimativa da produção de biogás	40
3.8	Apresentação dos resultados	42
4	RESULTADOS	42

5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	55
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICE A – População dos municípios do Vale do Jaguaribe	63
	APÊNDICE B – Geração per capita de RSU do Vale do Jaguaribe	64

1 INTRODUÇÃO

A disposição final ambientalmente adequada e a excessiva geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) se apresentam como um dos maiores desafios para a sociedade. Além do crescimento da produção, há a problemática dos riscos oriundos de um gerenciamento inadequado. Desde a Conferência Rio 92, o assunto tem sido tratado com maior prioridade, uma vez que afeta, direta ou indiretamente, o modo de vida da população e sua relação com o ambiente (JACOBI e BESEN, 2006).

Quando dispostos de maneira irregular, os RSU são potenciais causadores de danos em diferentes áreas, a exemplo da proliferação de doenças. Além disso, o lixiviado pode ser responsável pela contaminação de recursos naturais. Nesse sentido, os países, através da aplicação de políticas públicas, têm buscado a consolidação de uma gestão integrada e sustentável de resíduos sólidos.

Dessa forma, além de incentivar mudanças nos hábitos de consumo da população, é necessário fomentar, em diferentes setores sociais, ações que estimulem o reaproveitamento, a coleta seletiva e a reciclagem. A partir da disposição dos resíduos, é possível fazer o aproveitamento energético da matéria que irá se decompor.

Nesse contexto, os aterros sanitários se apresentam como um dos principais integrantes de uma gestão adequada de RSU. Nesses locais, para que seja evitada a contaminação, é feita uma impermeabilização no solo com geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Os resíduos passam por compactação e ocupam menor volume, para que seja feita a cobertura com camadas de terra (FIGUEIREDO, 2011).

1.1 Justificativa

De acordo com a Secretaria do Meio Ambiente do Ceará (2015), o Estado ainda conta com cerca de 300 lixões, mas tem implementado ações para que, em até 20 anos, os resíduos sólidos gerados tenham como destino os aterros sanitários. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019), 40% dos RSU no país ainda são dispostos em locais inadequados. Na região nordeste, o índice está em 35,3%.

Diante do aumento da produção de RSU, faz-se necessário analisar medidas que diminuam o impacto socioambiental desse fato. Para isso, uma das opções é a destinação de

RSU em locais ambientalmente adequados, como os aterros sanitários, que podem ser construídos ou adaptados com um sistema de aproveitamento energético.

A construção e manutenção do aterro nas proximidades de Limoeiro do Norte-CE, proporciona benefícios sociais para a região, tais como a geração de emprego e renda, além de atenuação de impactos ambientais negativos, já que os lixões podem gerar problemas de saúde pública, e agredem os recursos naturais. Além disso, o aproveitamento do biogás de aterro provoca a redução da emissão de gases do efeito estufa, a exemplo do metano.

Portanto, o presente trabalho, considerando as particularidades de cada município, como a composição gravimétrica e sua população urbana, irá estimar o potencial de geração de energia elétrica das 15 cidades do Vale do Jaguaribe, a partir do biogás gerado por meio da biodegradação dos resíduos. Dessa maneira, considera-se que haverá a captação de biogás no aterro, servindo como fonte de combustível, e permitindo sua utilização em diferentes atividades.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Estimar o potencial de geração de biogás e de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos no Vale do Jaguaribe-CE.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estimar a produção de biogás dos RSU provenientes do Vale do Jaguaribe;
- Relacionar a geração de biogás com o potencial de geração de energia elétrica da região;
- Verificar o cenário geral da gestão de RSU no Vale do Jaguaribe.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Políticas públicas de gestão de resíduos sólidos e as projeções populacionais

O crescimento populacional e os avanços tecnológicos observados nas últimas décadas são responsáveis por mudanças na forma de produção e consumo das sociedades. Além da geração excessiva de resíduos que são já comuns à população, existe a presença de novos materiais nocivos, que são componentes de produtos que não faziam parte do cotidiano, a exemplo de alguns eletrônicos, o que aumenta a periculosidade do descarte e do manejo inadequados. Acompanhado disso, há uma notória falta de locais que garantam uma disposição final ambientalmente correta do que foi gerado. Diante desse cenário, verifica-se a necessidade de uma gestão ampla dos resíduos sólidos, com o objetivo de frear ou evitar consequências negativas ao meio ambiente e às futuras gerações.

Em vista disso,

A gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos inclui a redução da produção nas fontes geradoras, o reaproveitamento, a coleta seletiva com inclusão de catadores de materiais recicláveis e a reciclagem, e ainda a recuperação de energia” (JACOBI e BESEN, 2011, p. 135).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 10.004 (2004, p. 1) define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Os municípios brasileiros, em geral, descartam os resíduos sólidos com pouco ou nenhum critério, atitude que ocasiona problemas em diferentes níveis, tais como a poluição da água e do solo, gerando prejuízos ao meio ambiente, além de facilitar a proliferação de microrganismos patogênicos, refletindo em complicações de saúde pública. Então, o Estado, em parceria com diferentes setores da sociedade, busca desenvolver políticas públicas que promovam educação ambiental e responsabilidade compartilhada. Essa incumbência ao Poder Público está explicitada no art. 225, § 1, inc. VI da Constituição Federal de 1988. Nele, é assegurado que todos os cidadãos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, o tratando como um bem de uso coletivo do povo e fundamental à qualidade de vida sadia. Para

isso, a esfera governamental deve “promover a educação ambiental em todos os níveis de ensino e a conscientização pública para a preservação do meio ambiente” (BRASIL, 1988, art. 225). Diante desse cenário, as políticas públicas podem ser da esfera municipal, estadual e federal.

Conforme a Lei Federal nº 6.938 (BRASIL, 1981), a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) procura regulamentar diferentes atividades que, direta ou indiretamente, envolvam o meio ambiente. Entre os objetivos dela estão: “a compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade e do equilíbrio ecológico; o estabelecimento de critérios e padrões de qualidade ambiental e de normas” (BRASIL, 1981, art. 4). Entretanto, ainda era necessária a implementação de um instrumento que tratasse das diretrizes relacionadas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Nesse sentido, foi instituída, em 2010, a Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010) ou Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), que teve seu processo de tramitação iniciado em 1989.

Portanto, a PNRS (2010, art. 4) reúne

O conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos.

Anteriormente à PNRS, outros instrumentos já faziam referência aos resíduos em suas publicações e normativas, a exemplo das resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e da Política Federal de Saneamento Básico (PFBSB), Lei Federal nº 11.445 (BRASIL, 2007).

Preferencialmente, o processo que se deseja ver na PNRS é: redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, assim como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Com ela, as bases para uma gestão racional e sustentável de resíduos são fortalecidas. Além disso,

Propõe medidas de incentivo à formação de consórcios públicos para a gestão regionalizada com vistas a ampliar a capacidade de gestão das administrações municipais, por meio de ganhos de escala e redução de custos no caso de compartilhamento de sistemas de coleta, tratamento e destinação de resíduos sólidos. (JACOBI e BESEN, 2006, p. 137).

É fruto da PNRS, por exemplo, o Comitê Orientador para a Implantação de Sistemas de Logística Reversa (Cori), criado em 2011 com o objetivo de definir os parâmetros para o processo de devolução dos resíduos à indústria, para que sejam reaproveitados em outro ciclo.

Ao ser compatível e estar ligada com diferentes leis, a PNRS funciona como uma estrutura essencial para a gestão adequada de RSU. Dentre algumas ações, ela não só determina o fim das atividades dos lixões, como também exige dos órgãos competentes, sejam estaduais

ou municipais, a elaboração de planos de resíduos sólidos, acompanhados de metas para a redução e outras finalidades dos rejeitos. Nesse sentido, apesar dos esforços da União, como na construção de aterros sanitários e capacitação de profissionais, é necessário que os gestores municipais adequem as políticas de gestão de acordo com a realidade local, buscando, dessa forma, soluções com o maior aproveitamento possível.

No contexto de ações conjuntas entre diferentes setores, estão a reciclagem e a coleta seletiva. Elas são partes fundamentais dos modelos de gestão integrada de resíduos, uma vez que potencializam os benefícios oriundos de uma coleta, tratamento e disposição adequados dos RSU. Segundo Bringhenti (2004, p.14),

A coleta seletiva pode ser definida como: a etapa de coleta de materiais recicláveis presentes nos resíduos sólidos urbanos, após sua separação na própria fonte geradora, seguido de seu acondicionamento e apresentação para coleta em dias e horários predeterminados, ou mediante entrega em Postos de Entrega Voluntária, em Postos de Troca, a catadores, a sucateiros ou a entidades beneficentes.

Já a reciclagem, conforme Galbiati (2008, p.1) é conceituada como:

Processo de reaproveitamento dos resíduos sólidos, em que os seus componentes são separados, transformados e recuperados, envolvendo economia de matérias-primas e energia, combate ao desperdício, redução da poluição ambiental e valorização dos resíduos, com mudança de concepção em relação aos mesmos.

2.2 Aterros sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos

A destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos é um dos grandes desafios enfrentados pela gestão pública e pelos demais setores sociais. O volume exacerbado de rejeitos é fruto, principalmente, da crescente produção industrial e do consumo em ampla escala, aliados à diminuição da vida útil dos produtos. Junto com a urbanização, é possível observar uma diminuição das áreas adequadas para implementação de locais destinados ao recebimento de resíduos.

Assim, os aterros sanitários, desde que sejam construídos de acordo com as exigências técnicas, surgem como uma alternativa para essa problemática. No cenário nacional, de acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), em 2008 apenas 27,7% dos municípios brasileiros dispuseram seus resíduos em aterros sanitários, ante 50,8% em vazadouros a céu aberto e 22,5% em aterro controlado. Já em 2018, segundo o panorama da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), 2.569 municípios (46% do total) fizeram a destinação final dos RSU em aterros sanitários, contra 27% em lixões e 27% em aterro controlado. O aterro sanitário tem sido a maneira mais

buscada para a destinação dos detritos nos centros urbanos, uma vez que ele se destaca devido ao baixo custo e à elevada capacidade de absorção de rejeitos, se comparado com outros métodos de destinação, como incineração e compostagem.

Os resíduos são dispostos sobre um solo coberto por camadas inertes, buscando não causar danos à saúde pública, além de minimizar os possíveis impactos ambientais. O aterro sanitário diferencia-se dos lixões, uma vez que esses são vazadouros a céu aberto, em que não há nenhum tratamento adequado para o resíduo. Portanto, a ausência de critérios técnicos e sanitários nos lixões é responsável pela proliferação de doenças, causando riscos às pessoas que, para sobreviver, coletam materiais nessas áreas. Além disso, há o risco de contaminação do ar, solo e lençol freático (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL, 2007).

No aterro sanitário pode-se, por exemplo, aproveitar o biogás produzido na decomposição anaeróbia da matéria orgânica para geração de energia, minimizando a emissão de um gás causador do efeito estufa, pois conforme Wereko-Brobby e Hage (2000), o biogás é composto por aproximadamente 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de outras misturas. Em vista disso, é uma alternativa que apresenta diversas vantagens para sua aplicação.

De acordo com a ABNT, por meio da NBR 8.419 (1992, p.1), o aterro sanitário de resíduos sólidos urbano é definido como:

Uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Dessa forma, sua implementação necessita de atenção não somente na escolha e preparo do local, como também na sua operação e monitoramento.

A ABNT preconiza os parâmetros técnicos necessários para a construção de um aterro sanitário. Para os de Classe II, que são aqueles destinados a receber rejeitos não perigosos, os parâmetros são listados na NBR 8.419 (1992, p. 1-5). Nela, as diretrizes técnicas dos elementos essenciais aos projetos de aterros são descritas, tais como:

Impermeabilização da base e impermeabilização superior, monitoramento ambiental e geotécnico, sistema de drenagem de lixiviados e de gases, exigência de células especiais para resíduos de serviços de saúde, apresentação do manual de operação do aterro e definição de qual será o uso futuro da área do aterro após o encerramento das atividades.

Antes de ser implementado, o aterro tem por obrigação seguir as licenças definidas pelos órgãos ambientais, seja no âmbito municipal, estadual ou federal. Em nível nacional, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o responsável pelo licenciamento desse

tipo de atividade. Suas resoluções são imprescindíveis para que não haja problemas com legalidade. A Resolução CONAMA 01/1986, por exemplo, define responsabilidades e critérios para a Avaliação de Impacto Ambiental e apresenta atividades que necessitam do Estudo de Impacto Ambiental (EIA), bem como do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). Devem ser expedidas a Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO).

Inicialmente, são realizados estudos preliminares. Eles são responsáveis pela coleta de dados que vão resultar na caracterização do município, como a geração per capita de rejeitos, o tipo de limpeza e varrição pública executados e a composição gravimétrica. Com a adequada interpretação dessas informações, é possível a criação de um diagnóstico de como funciona e o nível do processo de gerenciamento de resíduos sólidos na região.

Posteriormente, a área de construção deve ser escolhida. Essa decisão é de suma importância, já que pode evitar gastos desnecessários com a execução, além de problemas com populares. Então, é feita uma escolha preliminar de áreas disponíveis no município, para que sejam feitos levantamentos bióticos, além de topográficos, geológicos, geotécnicos e climatológicos. Conforme a NBR 13.896 (1997, p.3) alguns critérios devem ser verificados na escolha, como:

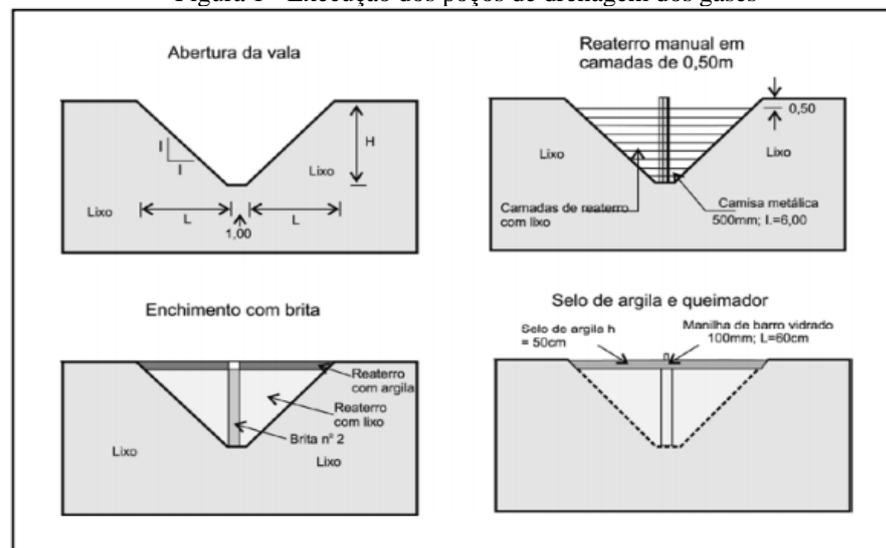
- o aterro não deve ser instalado em áreas sujeitas à inundação;
- entre a superfície inferior do aterro e o mais alto nível do lençol freático deve haver uma camada natural de solo, de espessura mínima de 1,50m;
- o aterro deve ser instalado em uma área onde haja predominância de material de baixa permeabilidade, com coeficiente de permeabilidade (k) inferior a 5×10^{-5} cm/s;
- o aterro só pode ser construído em área permitida, conforme legislação local de uso do solo;
- deve-se atentar para a proximidade de aeroportos e aeródromos.

Na etapa de execução, alguns elementos de projeto exercem função primordial, pois não somente tornam a obra segura, como também ambientalmente legal. Além de sistemas de impermeabilização inferior e superior, deve haver instrumentos para a captação, armazenamento e tratamento dos lixiviados e do biogás. De acordo com o MDL aplicado a resíduos sólidos (2007, p. 18-21), são elementos de projeto:

- Sistema de drenagem de águas superficiais: Sua função é evitar que o aterro receba infiltração de águas de escoamento superficial, o que pode causar instabilidade devido às poro-pressões reduzidas.

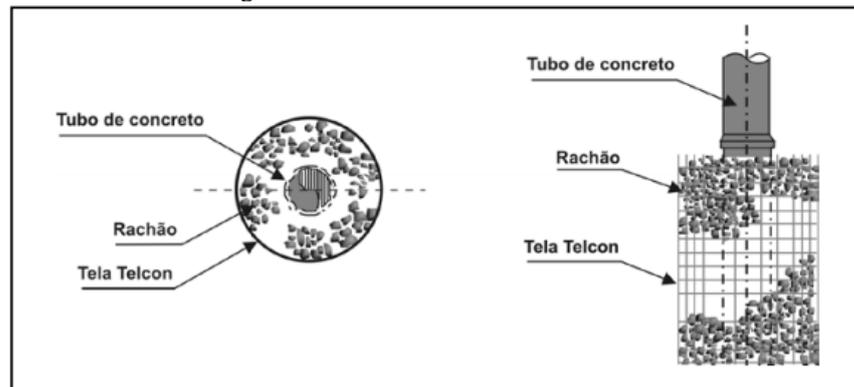
- Sistema de impermeabilização de fundo e laterais: Tem como objetivo combater a percolação do lixiviado, líquido poluente originado da decomposição de resíduos orgânicos, para o subsolo e aquíferos da região. Essas camadas podem ser de argila compactada com permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s ou geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), com espessura mínima de 1mm.
- Sistema de drenagem dos lixiviados: Deve estar acima da camada impermeabilizante inferior. Ela pode ser feita por meio de um conjunto de drenos internos, frequentemente feitos de tubos perfurados e preenchidos com brita, levando o lixiviado drenado para tratamento.
- Sistema de tratamento dos lixiviados: Como são altamente contaminantes, podem exigir tratamento combinado. Os mais usuais são: lodos ativados, lagoas, filtros biológicos, que são processos biológicos, e coagulação, filtração, diluição e floculação, que são tratamentos físico-químicos.
- Cobertura intermediária e final: Busca amenizar a taxa de formação de lixiviados e a exalação de odores, além de impedir a proliferação de vetores e a saída sem controle do biogás.
- Sistema de drenagem dos gases: Possui como função evitar o escape de gases pelos meios porosos do subsolo. Geralmente, os drenos são constituídos por uma coluna de tubos perfurados de concreto armado, envolvidos por uma camada, que pode ser de brita ou rachão, e então fixada à coluna por meio de uma tela metálica. O esquema pode ser observado nas duas imagens seguintes:

Figura 1 - Execução dos poços de drenagem dos gases



Fonte: Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos - SEDU/IBAM (2001)

Figura 2 - Detalhes dos drenos utilizados



Fonte: Iturri (2006)

Além desses elementos, é necessário o monitoramento do aterro, durante o funcionamento e encerramento das atividades, tanto de critérios ambientais, como geotécnicos, a fim de garantir, principalmente: segurança da população da região, preservação do meio ambiente e a segurança da obra. (Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2007)

2.3 Aproveitamento energético em aterros sanitários

Segundo Hinrichs e Kleinbach (2003), a energia é um dos principais pilares da sociedade moderna, sendo indispensável tanto para a produção de bens, com base em recursos naturais, quanto para o oferecimento de serviços. Porém, apenas a geração de energia não é o bastante, é preciso que essa produção seja limpa e com métodos diversificados, tanto que foi criada, em 2002, a Lei Federal nº 10.438 (BRASIL, 2002), responsável por estabelecer o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa).

Nesse contexto, o aproveitamento energético em aterros sanitários é uma alternativa para contribuir com o preenchimento desta lacuna, já que se caracteriza como um MDL, criado pelo Protocolo de Kyoto. O aproveitamento de energia consiste na transformação energética existente na degradação dos resíduos sólidos. A partir daí, pode-se, por exemplo, permitir a geração de energia elétrica, vapor ou utilização para combustível automotivo. (MMA, 2007)

Independentemente da finalidade do biogás obtido, os aterros sanitários devem possuir sistema de drenagem e coleta dos gases produzidos pela decomposição dos rejeitos. Conforme Ensinas (2003), os sistemas de coleta podem ser passivo ou ativo. O passivo, para evitar a emissão descontrolada para a superfície e passagem indevida pelo solo, drena os gases para a atmosfera. Por sua vez, o ativo, que é utilizado em instalações destinadas ao aproveitamento energético, é constituído também por exaustores e compressores.

Pode-se, por exemplo, direcionar o gás para o abastecimento de uma rede canalizada ou destiná-lo para o uso industrial. Além disso,

Outra possibilidade de aproveitamento do biogás é o seu uso em pequenas aplicações como no aquecimento de estufas, acompanhado pela recuperação do dióxido de carbono resultante da queima nas caldeiras, que pode ser reutilizado para favorecer o crescimento das plantas quando diluído em frações que não afetem o desenvolvimento dos vegetais. Além disso, pode-se utilizar o gás na evaporação do lixiviado gerado no aterro, com sistemas de queima do gás metano e coleta do vapor de lixiviado resultante, que pode ainda ser aproveitado como gás combustível juntamente com o gás do aterro não usado (ENSINAS, 2003, p. 19-20).

2.4 Origem do biogás

Como um dos produtos da matéria orgânica em decomposição, Jan Baptiste van Helmont constatou, em 1630, a liberação de um gás inflamável. Entre outros 15 tipos de gases, o inflamável tinha sua concentração aumentada durante a putrefação. (KHOIYANGBAM, GUPTA e KUMAR, 2011)

Thomas Shirley, em 1667, após relatos de moradores, visitou um terreno pantanoso na região de Wigan, Inglaterra. No local, ao aproximar uma vela acesa da água, foi observado o surgimento de uma chama que queimava vigorosamente. (PHILOSOPHICAL TRANSACTION, 1666)

Entretanto, apenas em 1776, após os estudos sobre o gás serem ampliados, foi que Alessandro Volta detectou a presença de metano em sedimentos no fundo de lagos e rios. Em meados de 1850, Reiset notou a aparição do metano em estrumeiras, fato que o levou a iniciar pesquisas sobre a caracterização desse tipo de resíduo, com o objetivo de detalhar o processo de decomposição anaeróbia. (HIRANO, 2015)

No século XIX, Ulysse Gayon, orientado por Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia, decomposição sem a presença de oxigênio, de uma mistura de estrume e água a 35°C. Nesse processo, foram obtidos cerca de 100 litros de gás/m³ de resíduos. (NOGUEIRA, 1986)

Em meados de 1860, a primeira planta de digestão anaeróbia passou a operar em Bombaim, Índia. Além disso, em 1895, na cidade de Exeter, Inglaterra, o combustível utilizado na iluminação pública era proveniente do biogás recuperado dos poços das estações de tratamento de esgoto. (HENRIQUES, 2004)

De acordo com Nogueira (1986), a partir das décadas de 1950 e 60, o processo de biodigestão passou a ser utilizado com maior intensidade, objetivando o aproveitamento energético. Nesse sentido, Índia e China foram os pioneiros ao desenvolverem modelos próprios de biodigestores, incentivando pesquisas na área.

Apesar dos benefícios observados nos países asiáticos citados, segundo Pecora (2006), foi somente com a crise do petróleo, na década de 1970, que diversas nações buscaram opções para substituir esse combustível. Dessa forma, a recuperação de energia advinda dos processos de tratamento anaeróbio foi impulsionada.

Porém, como exposto por Nogueira (1986), as soluções para os problemas de desenvolvimento devem ser apropriadas às necessidades, às capacidades e recursos humanos, aos recursos financeiros e à cultura. A busca e o estímulo recebidos durante a crise do petróleo, então, não foram suficientes para tornar a substituição por modelos sustentáveis uma ampla realidade observada em alguns países.

2.5 Caracterização do biogás

O Ministério de Minas e Energia - MME (2018) caracteriza o biogás como uma mistura gasosa de dióxido de carbono e metano, com propriedades semelhantes ao gás natural, porém, apresentando menor poder calorífico. Ainda de acordo com o MME, o biogás pode ser produzido tanto naturalmente, por meio da ação de bactérias em meio anaeróbio, quanto artificialmente, com o uso de um biodigestor anaeróbio.

Como citado anteriormente, de acordo com Wereko-Brobby e Hagen (2000), a composição mais comum do biogás é de cerca de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio. Entretanto, o biogás pode apresentar de 40 a 80% de metano. A quantidade é influenciada por alguns fatores, como temperatura e pressão durante o processo de fermentação.

2.6 Fases de degradação dos resíduos que culminam na produção do biogás

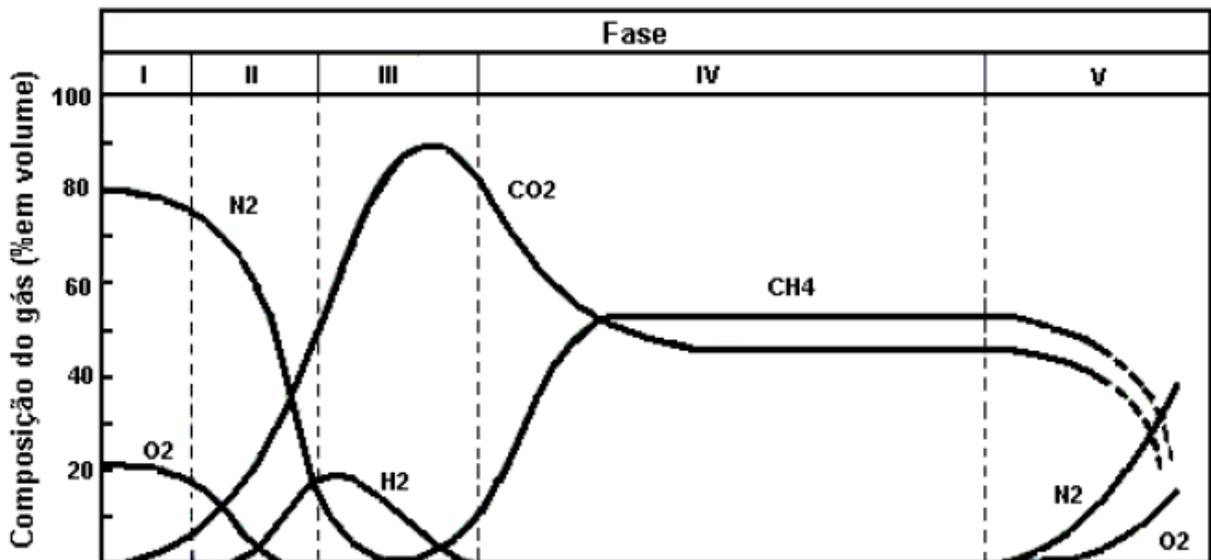
Como já apresentado, os aterros sanitários têm sido a alternativa mais utilizada para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos. Com isso, há o aumento da geração de biogás resultante da decomposição desses resíduos. Dessa maneira, é necessário conhecer o processo

de formação do biogás para que não seja feito somente o aproveitamento energético dele, como também os procedimentos de preservação ambiental e das comunidades locais.

De acordo com Castilhos *et al.*, (2003), os RSU são degradados por meio de um processo longo, que é função da velocidade de degradação dos substratos que o compõem, e sequencial, devido aos diferentes metabolismos que se sucedem ou se superpõem. Na parte superior dos aterros, que possui alta concentração de oxigênio, tem-se a predominância de uma zona aeróbia. Em seguida, há uma zona de transição, ou facultativa, e depois, onde a quantidade de oxigênio é praticamente nula, está situada a zona anaeróbia.

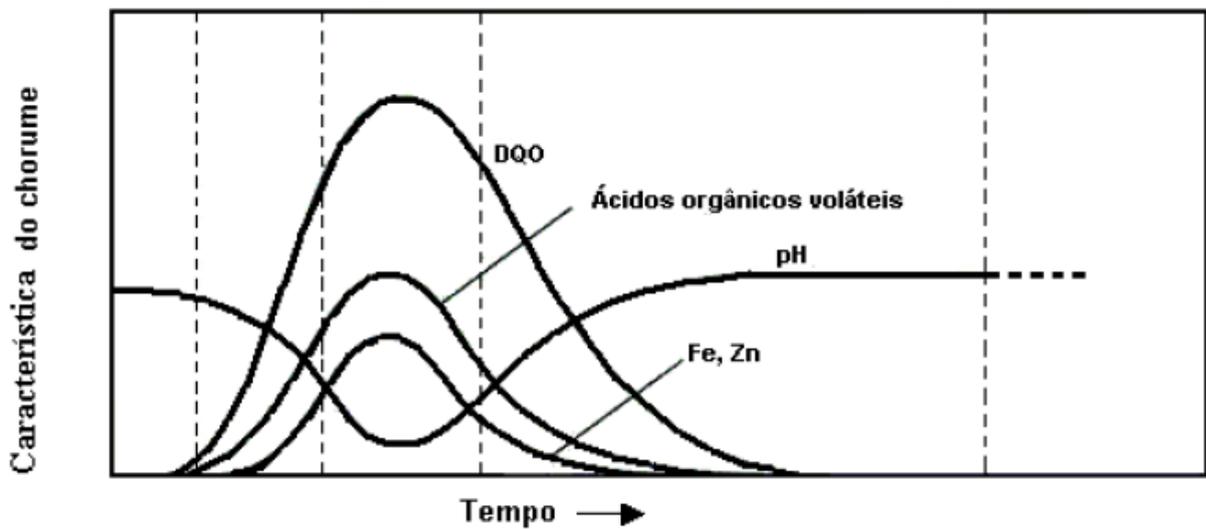
Existem diferentes modelos que caracterizam e simulam a decomposição da fração orgânica dos resíduos em aterros sanitários. Porém, ainda que diversas formas de interpretação do processo de digestão anaeróbia sejam observadas, as diferenças não estão nos conceitos, mas no nível de detalhe dessas classificações. (CINTRA, 2003). Nesse contexto, o modelo mais conhecido é descrito por Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993), que tem algumas de suas características apresentadas nas duas imagens a seguir:

Figura 3 - Composição do gás (% em volume) nas respectivas fases



Fonte: Ensinas (2003) adaptado de Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

Figura 4 - Característica do lixiviado em função do tempo



Fonte: Ensinas (2003) adaptado de Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

Ainda segundo Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) e adaptado por Catapreta (2008), as fases mostradas nas imagens anteriores são descritas da seguinte forma:

- Fase I – Ajustamento inicial: Nessa fase, ocorre a decomposição dos componentes biodegradáveis presentes nos RSU dispostos no aterro sanitário. A decomposição é processada, principalmente, em condições aeróbias, uma vez que determinada quantidade de oxigênio é fixada no aterro durante o processo de deposição e acomodação dos resíduos. Nesse sentido, a maioria dos organismos aeróbios e anaeróbios que farão a decomposição provém dos próprios resíduos dispostos, ou do solo utilizado para a cobertura.

- Fase II – Transição: Com o consumo do oxigênio, o ambiente anaeróbio começa a predominar. Há, portanto, a transição da fase aeróbia para anaeróbia. Aqui, nitrato e sulfato podem atuar como aceptores de elétrons nas reações de conversão anaeróbia. Geralmente, são reduzidos em gás nitrogênio e gás sulfídrico. Por meio da medição do potencial de oxidação-redução do resíduo, pode ser realizado o monitoramento das reações de redução. Para nitratos e sulfatos, ocorre aproximadamente entre -50 a -100 milivolts. Quando os valores estão entre -150 a -300 milivolts, o metano é produzido. Devido à contínua queda do potencial de oxidação-redução, ocorre o surgimento de compostos intermediários, como ácidos graxos voláteis.

- Fase III – Ácida: Aqui, há a aceleração das reações iniciadas na fase de transição com a produção de quantidades consideráveis de ácidos orgânicos e menores quantidades de gás hidrogênio. Inicialmente, acontece a transformação enzimática, por hidrólise, dos compostos de maior massa molecular, como lipídeos, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos, em compostos viáveis para que microrganismos os utilizem como fonte de energia. Após isso, na

acidogênese, os componentes resultantes da etapa anterior são envolvidos em uma conversão microbiológica para compostos intermediários de menor massa molecular, a exemplo do ácido acético (CH_3COOH) e pequenas concentrações de outros ácidos de maior complexidade. Durante essa fase, o dióxido de carbono é o principal gás, porém, pequenas quantidades de H_2 também são produzidas. Os microrganismos responsáveis pela conversão, caracterizados genericamente como não metanogênicos, são bactérias anaeróbias facultativas e específicas. Devido à dissolução de ácidos orgânicos no lixiviado, as demandas bioquímica (DBO) e química de oxigênio (DQO) e a condutividade do lixiviado aumentam significativamente nessa fase. Além disso, ocorre a liberação de nutrientes com nitrogênio e fósforo, úteis para o crescimento da biomassa.

- Fase IV – Metanogênica: Organismos estritamente anaeróbios, chamados de metanogênicos, são predominantes nessa etapa. Eles são responsáveis pela conversão de ácido acético e gás hidrogênio, da fase anterior, em CH_4 e CO_2 . A formação de metano e dos ácidos acontece simultaneamente, apesar da redução nas taxas de formação dos ácidos. Observa-se, na maioria das vezes, uma queda acentuada na DQO e um aumento na produção de gás.

- Fase V – Maturação final: Ocorre após a biodegradação e conversão da matéria orgânica em CH_4 e CO_2 na fase anterior. A quantidade de gás gerada diminui bastante, uma vez que os nutrientes que não foram consumidos nas fases anteriores são de lenta biodegradação. Além disso, é possível que pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio sejam encontradas. Isso depende das condições de fechamento do aterro.

Na Tabela 1, é apresentada a duração de cada fase, de acordo com Augenstein e Pacey (1991). Os intervalos variam em função de alguns fatores, como o nível de compactação da camada e suas taxas de nutriente, além da água presente nos resíduos.

Tabela 1 - Intervalo de duração de cada fase

Fases	Intervalo de duração
I	Algumas horas - 1 semana
II	1 - 6 meses
III	3 meses - 3 anos
IV	8 - 40 anos
V	1 ano - mais de 40 anos

Fonte: Augenstein e Pacey (1991)

2.7 Fatores que influenciam a geração do biogás de aterro

Conforme Castilhos *et al.*, (2003), a geração do biogás de aterro é condicionada por diferentes elementos. São exemplos: umidade presente nos resíduos, tamanho das partículas, natureza dos resíduos, temperatura, pH, nutrientes, oxigenação e capacidade tampão. Brito Filho (2005) descreve alguns dos fatores responsáveis pelo nível de biogás resultante. São eles:

- **Composição do resíduo:** O potencial de geração do biogás é diretamente proporcional ao nível de material orgânico componente do resíduo. Materiais plásticos, metálicos ou concreto, em virtude do tempo excessivo para ocorrer degradação, não colaboram com a produção de biogás a partir de resíduos sólidos. Dessa forma, não contribuem significativamente para a produção de gás no aterro. Por outro lado, resíduos de alimentos, que possuem matéria orgânica de fácil decomposição, aceleram a taxa de produção do biogás. Ademais, existem resíduos biodegradáveis que, apesar de não serem inertes, apresentam lenta decomposição, não contribuindo para uma grande geração de gás, vide materiais que contêm lignina.

- **Umidade:** Em uma faixa ótima de umidade, quanto maior o teor de umidade, maiores serão os níveis de produção de gás. Isso é limitado pela umidade de saturação. Infiltrações em excesso podem ocasionar retardamento da produção. Nessas condições, há o favorecimento da fermentação ácida da matéria orgânica, que provoca liberação de quantidades consideráveis de ácidos graxos voláteis, tornando o meio muito ácido para a sobrevivência dos microrganismos metanogênicos. São fatores que causam alterações no teor de umidade: infiltração de águas superficiais e influxo de águas subterrâneas, umidade com que o resíduo chega ao aterro, nível de água gerado na decomposição, dentre outros.

- **Tamanho das partículas:** A decomposição de partículas menores será mais rápida, uma vez que quanto menor a unidade da partícula, maior será a sua área de superfície específica. Dessa forma, a decomposição em um aterro que aceita resíduos inteiros, em comparação a um que aceita somente resíduos fracionados, terá menores taxas.

- **Idade do resíduo:** A geração de gás possui duas variáveis que dependem do tempo. O tempo de atraso é o intervalo entre a disposição dos resíduos até o início da geração de metano, ou seja, o começo da fase III. Já o tempo de conversão compreende o intervalo que vai da disposição dos resíduos até o término da geração de metano, no final da fase V. Nesse sentido, resíduos mais novos apresentam maior potencial de geração de metano, em comparação aos antigos, que já sofreram processo de decomposição.

- pH: Dentro da faixa ótima de pH, onde há elevação nas taxas de metanogênese, a produção de metano é maximizada. Fora da faixa ótima – um pH abaixo de 6 ou acima de 8 – a produção de metano é estritamente limitada.

- Temperatura: Os níveis de temperatura estão ligados aos tipos de bactérias predominantes e ao nível de geração do gás. Bactérias mesofílicas possuem faixa ótima de temperatura entre 30 a 35°C. Para bactérias termofílicas, o intervalo é de 45 a 65°C. Contudo, apesar das termofílicas produzirem elevados níveis de gás, grande parte dos aterros está na faixa das mesófilas. Até 45 dias após a disposição dos resíduos, ocorre a máxima temperatura. Simultaneamente ao desenvolvimento das condições anaeróbias, acontece a diminuição de temperatura. O gás produzido no aterro possui temperaturas que variam entre 30 a 60°C.

- Outros fatores: Potencial de oxidação-redução, presença de nutrientes, bactérias, compactação dos resíduos, área e profundidade do aterro, operação do aterro e processamento de resíduos variáveis são outros parâmetros que podem influenciar na taxa de geração de gás.

2.8 Estimativa do potencial de emissão de biogás

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, do inglês Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), apresentou, em 1996, um método para determinar o potencial de geração de biogás em aterros sanitários. De acordo com IPCC (2006), o modelo, ao considerar parâmetros próprios de cada localidade, permite a estimativa de geração em diferentes regiões geográficas.

Ainda segundo IPCC (2006), obtém-se uma projeção da quantidade de material orgânico degradável no RSU, possibilitando determinar o nível de metano que pode ser gerado. Para isso, dentre outros fatores, as especificidades dos diferentes tipos de resíduos domésticos são consideradas no cálculo. Objetivando maior precisão nas projeções, o IPCC recomenda coleta de dados estatísticos sobre a população e a característica dos RSU. Não havendo, são utilizados padrões fornecidos pelo IPCC.

A Equação 1 determina a quantidade de CH₄, em toneladas, emitida por ano.

$$Q_{CH_4} = [(POP_{urb} \times TAXA_{rsu} \times RSU_f \times L_0) - R] \times (1 - OX) \quad (1)$$

Fonte: IPCC (1996)

Sendo:

Q_{CH_4} = Emissão de gás metano (tonelada de CH_4 /ano)

POP_{urb} = População urbana (n° de habitantes)

$TAXA_{rsu}$ = Taxa anual de geração de RSU per capita (kg_{RSU} / habitante*ano)

RSU_f = Fração de RSU depositada em aterros sanitários (%)

L_0 = Potencial de geração de metano dos RSU (tonelada de CH_4 /t de RSU)

R = Metano recuperado (tonelada de CH_4 /ano)

OX = Fator de oxidação de metano na superfície do aterro.

O IPCC (2006) afirma que o potencial de geração de metano dos RSU (L_0) pode ser utilizado não somente na metodologia desenvolvida pelo Painel, como também em softwares destinados à projeção de metano gerado nos aterros sanitários. Nesse contexto, L_0 é determinado através da Equação 2.

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

Fonte: IPCC (1996)

Sendo:

L_0 = Potencial de geração de metano dos RSU (tonelada de CH_4 /t de RSU)

FCM = Fator de correção de metano (%)

COD = Carbono orgânico degradável (kg_C/kg_{RSU})

COD_f = Fração de COD dissolvida (kg_C/kg_{RSU})

F = Fração de metano no biogás de aterro

$\frac{16}{12}$ = Fator de conversão de carbono em metano (tonelada de CH_4 /t de C).

Conforme IPCC (1996), o COD representa o carbono orgânico que está disponível para decomposição bioquímica. Ele é função da composição dos resíduos e pode ser determinado através de uma média ponderada do teor de carbono de vários componentes dos resíduos sólidos urbanos. Dessa forma, é considerada a composição gravimétrica dos RSU e a quantidade de

carbono constatada em cada componente do RSU. Com a utilização de valores padrões de carbono por conteúdo, a Equação 3 estima o *COD*.

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,4 \times D) + (0,3 \times E) \quad (3)$$

Fonte: IPCC (1996)

Sendo:

A = Percentual de papel e papelão no RSU

B = Percentual dos resíduos de parques e jardins, como poda, jardinagem e outros materiais orgânicos não alimentícios no RSU

C = Percentual de resíduos alimentícios orgânicos no RSU

D = Percentual de têxteis no RSU

E = Percentual de madeira e resíduos florestais no RSU.

2.9 Estimativa do potencial de geração de energia elétrica

Conforme citado em “2.3 Aproveitamento energético em aterros sanitários”, o biogás, não apenas aquele que é resultante dos processos de degradação em aterros, pode ser utilizado para diferentes finalidades, gerando não somente redução de impactos ambientais negativos, mas também socioeconômicos. Sendo assim, a produção de energia elétrica se apresenta como uma das possíveis finalidades.

Dessa maneira, para estimar esse potencial, foram utilizadas equações sugeridas por ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade (2009), tendo como base a quantidade de CH₄ emitida. Ainda segundo ICLEI (2009), os motores do tipo Ciclo Otto são os mais utilizados para a queima do biogás, uma vez que possuem maior rendimento elétrico e menor custo, em comparação com outras tecnologias. Inicialmente, determina-se a potência disponível, seguindo a Equação 4:

$$P = \frac{Q_{CH_4} \times PCI \times \eta}{860000} \quad (4)$$

Fonte: ICLEI (2009)

Sendo:

P = Potência disponível (MW)

Q_{CH_4} = Quantidade de metano emitida (m^3CH_4 /dia)

PCI = Poder calorífico inferior do metano. Como não há valores de campo do aterro, e considerando 50% de metano presente no biogás, adotou-se PCI sendo $5500 \text{ kcal}/m^3CH_4$.

η = Eficiência de motores = 28%

860000 = Conversão de kcal para MW.

Em seguida, calcula-se a energia disponível:

$$E = P \times R \times T \quad (5)$$

Fonte: ICLEI (2009)

Onde:

E = Energia disponível (MWh/dia)

P = Potência disponível (MW)

R = Rendimento de motores a plena carga = 87%

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

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição do campo experimental

Os 15 municípios estudados compõem o Vale do Jaguaribe, uma região socioeconômica do Estado do Ceará. São eles: Alto Santo, Ererê, Iracema, Jaguaretama, Jaguaribara, Jaguaribe, Limoeiro do Norte, Morada Nova, Palhano, Pereiro, Potiretama, Quixeré, Russas, São João do Jaguaribe e Tabuleiro do Norte. Essa composição da região foi definida pela Lei Estadual Complementar nº 154 (CEARÁ, 2015). Na Figura 5, está ilustrada a posição geográfica do Vale do Jaguaribe no Estado.

Figura 5 - Regiões de planejamento do Estado do Ceará



Fonte: Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE (2015)

O clima predominante na região é o Tropical Quente Semiárido, que apresenta escassez e irregularidade pluviométrica associado a altas taxas de evapotranspiração. Os municípios possuem precipitação pluviométrica média de 800 mm/ano. (IPECE, 2012). Esses fatores contribuem para a ausência de umidade no maciço sanitário. Dessa maneira, o potencial máximo estimado de geração de biogás pode não ser atingido.

3.2 Critérios socioeconômicos

Conforme observado anteriormente, a geração de resíduos sólidos per capita é diretamente proporcional à melhoria dos índices socioeconômicos de determinada região. Segundo Maciel (2009), as diferenças nos aspectos culturais, além dos sociais e econômicos, influenciam na composição dos resíduos urbanos. De acordo com a Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF, 2018), os alimentos orgânicos estão mais presentes no cotidiano de famílias com menores rendas.

Por outro lado, produtos industrializados, que possuem maior valor no mercado, aparecem com maior frequência na mesa de famílias com rendimento per capita mais alto. Nesse contexto, foi feita uma análise dos 15 municípios do Vale do Jaguaribe, relacionando o PIB per capita (obtido a partir da razão entre a renda gerada pelo município e o total de habitantes dele), e o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), com a quantidade de matéria orgânica existente no resíduo.

Observou-se que das 10 cidades que mais possuem matéria orgânica em seu RSU, 8 delas também estão presentes nos 10 municípios com menores PIBs per capita. Essa tendência também foi observada ao analisar os IDHMs da região, mesmo com a variação de algumas cidades.

3.3 Políticas e iniciativas da gestão de resíduos no Ceará

Antes mesmo da promulgação da PNRS, no Ceará já existia a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS), sob a Lei Estadual Nº 13.103 (CEARÁ, 2001), almejando a implementação e consolidação de métodos de gerenciamento e gestão dos resíduos. Nesse cenário, o Governo do Estado criou o “Estudo de Viabilidade do Programa para o tratamento e

disposição de resíduos sólidos do Estado do Ceará”. Conforme a Secretaria das Cidades (2021), o programa sugeriu, em 2006, a regionalização dos municípios cearenses em 30 consórcios públicos. Ainda segundo a Secretaria, dentre os objetivos dessa iniciativa, estava a utilização e operação conjunta de aterros sanitários.

A organização responsável pela maioria dos municípios integrantes do Vale do Jaguaribe é o Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - Vale do Jaguaribe (CGIRS-VJ), cuja sede está situada em Limoeiro do Norte. De acordo com o Plano Regionalizado de Coletivas Seletivas Múltiplas (CGIRS-VJ, 2018) após a promulgação da PNRS, em 2010, houve a necessidade de uma revisão da PERS, buscando cumprir às exigências da recente política nacional.

Nesse contexto, o Governo do Estado sancionou, em 2011, a Lei Estadual Nº 15.086 (CEARÁ, 2011), responsável pela criação do Selo Verde, com o objetivo de “certificar produtos compostos por matéria-prima reciclada advinda de resíduos sólidos” (Lei 15.086/2011). O Selo concede benefícios fiscais para empresas no Estado. Essa certificação é conferida pela Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE), para cada produto que seja resultado da reciclagem de resíduos sólidos.

Além disso, a Secretaria do Meio Ambiente (SEMA) lançou, em 2018, a Política de Coletas Seletivas Múltiplas, com estudos individuais para cada município, objetivando a prática no Estado. Dessa forma, a Secretaria “viu a necessidade de trabalhar de forma cooperada com as entidades que possuem em suas diretrizes, ações que perpassam a política de Resíduos Sólidos, visando propiciar novos hábitos à sociedade de maneira geral.” (SEMA, 2018, online). Inicialmente, o Órgão busca reduzir o volume de resíduos dispostos em lixões, para que seja possibilitada, em seguida, a construção de aterros sanitários.

3.4 O panorama no Vale do Jaguaribe

Apesar desses e de outros incentivos, a coleta seletiva e reciclagem ainda não são práticas muito adotadas pelas indústrias nacionais, e isso se reflete no Ceará. Conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos do Ceará (SEMA, 2015), a maior parte dos resíduos industriais (36,2%) eram incinerados, ante 26,4% dos que eram reciclados. Quanto aos resíduos domiciliares e políticas públicas, o Quadro 1 mostra a presença ou ausência de alguns

componentes do contexto da gestão de resíduos: Lixões, coleta seletiva, centro de triagem e estabelecimento/deposeiro (locais que compram o material recolhido pelos catadores).

Quadro 1 - Disposição em lixões, coleta seletiva, centro de triagem e estabelecimento

Município	Disposição em lixões	Coleta Seletiva	Centro de triagem	Deposeiro
Alto Santo	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho
Ererê	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho
Iracema	Verde	Amarelo	Verde	Verde
Jaguetama	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde
Jaguaribara	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho
Jaguaribe	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde
Limoeiro do Norte	Verde	Vermelho	Amarelo	Verde
Morada Nova	Verde	Vermelho	Verde	Verde
Palhano	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho
Pereiro	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde
Potiretama	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde
Quixeré	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde
Russas	Verde	Amarelo	Verde	Verde
S. J. do Jaguaribe	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho
Tabuleiro do Norte	Verde	Amarelo	Vermelho	Verde

Fonte: Elaborado pelo autor com dados da SEMA e CGIRS-VJ (2021)

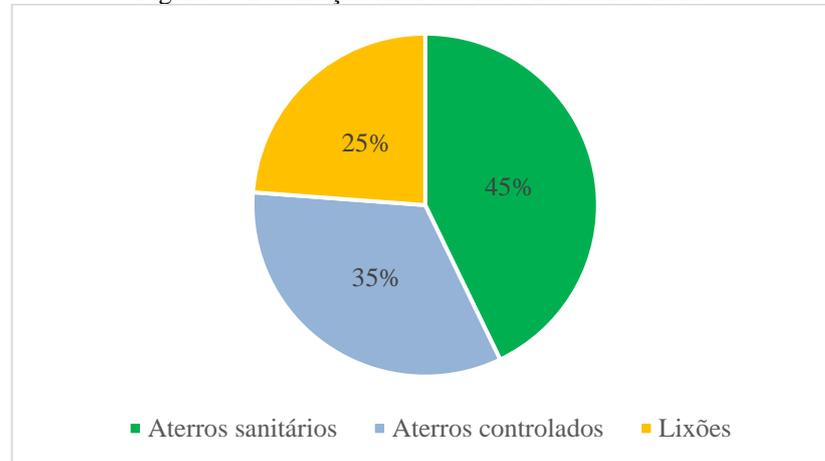
A cor verde representa a existência, sendo a ausência representada pela cor vermelha. Os municípios que possuem ou estão desenvolvendo projeto de coleta seletiva e/ou centro de triagem são apresentados na cor amarela.

Também inseridos no contexto da reciclagem, estão os catadores, que desempenham papel fundamental na maioria das cidades brasileiras, uma vez que esses trabalhadores coletam materiais com alto potencial para serem reciclados. Geralmente, a coleta é feita nas ruas ou nos lixões, expondo essas pessoas às condições insalubres observadas nesses locais. Ainda segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos do Ceará (SEMA, 2015), 123 (67%) dos 184 municípios cearenses possuem catadores nas instalações de disposição final dos resíduos. Os outros 61 municípios não possuem ou não informaram. No âmbito do Vale do Jaguaribe, todas as 15 cidades possuem a presença de catadores, seja nas ruas ou nos lixões.

Como apresentado anteriormente, o aterro sanitário é a medida ambiental e economicamente mais vantajosa para a destinação final dos resíduos sólidos, de preferência aqueles que já tenham passado por outros processos e não possam mais ser reaproveitados de alguma forma. Entretanto, em 2015, somente 45% dos RSU coletados no Ceará possuíam os

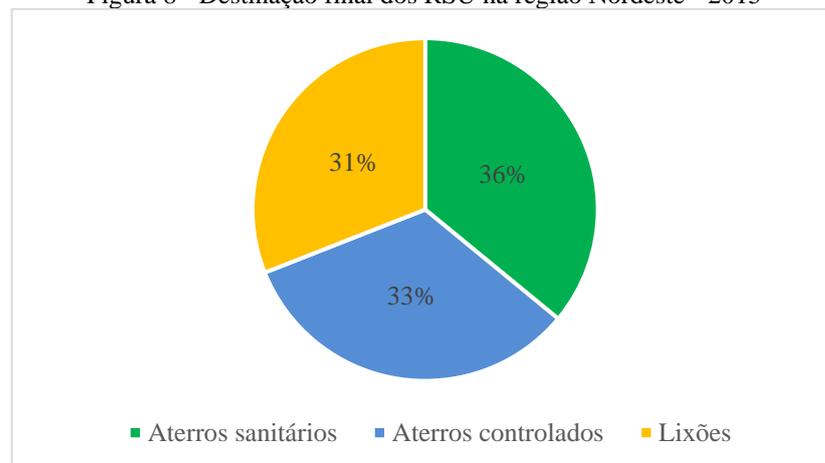
aterros sanitários como disposição final, contra 30% em aterros controlados, e 25% em lixões. Apesar disso, os índices do Estado estão acima da média regional. Os dados são do Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos (ABRELPE, 2015) e estão dispostos nas imagens a seguir.

Figura 7 - Destinação final dos RSU no Ceará - 2015



Fonte: ABRELPE (2015)

Figura 8 - Destinação final dos RSU na região Nordeste - 2015



Fonte: ABRELPE (2015)

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos do Ceará (SEMA, 2015), existem apenas cinco aterros sanitários no Estado, contra mais de 300 lixões, que tiveram seu fechamento determinado para 2014, conforme orientado pela PNRS. Os aterros sanitários estão localizados nas cidades de: Caucaia, Aquiraz, Maracanaú, Sobral e Brejo Santo. Sendo assim, nenhum deles está situado em cidades do Vale do Jaguaribe ou proximidades, fator que facilitaria a disposição em um local adequado. Na Tabela 3, está apresentada a distância da sede dos municípios do Vale para o aterro sanitário mais próximo, além da distância para o aterro que está em construção em Limoeiro do Norte.

Tabela 3 - Distância das cidades até o aterro sanitário mais próximo

Município	Distância ao aterro		
	Aterro de Aquiraz	Aterro de Brejo Santo	Aterro de Limoeiro do Norte
Alto Santo	238 km	-	45 km
Ererê	-	244 km	114km
Iracema	-	276 km	85km
Jaguaretama	243 km	-	106 km
Jaguaribara	227 km	-	57 km
Jaguaribe	-	209 km	111 km
Limoeiro do Norte	193 km	-	13 km
Morada Nova	165 km	-	36 km
Palhano	154 km	-	70 km
Pereiro	-	225 km	132 km
Potiretama	276 km	276 km	83 km
Quixeré	185 km	-	33 km
Russas	156 km	-	43 km
S. J. do Jaguaribe	210 km	-	17 km
Tabuleiro do Norte	203 km	-	15 km

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Diante da necessidade exposta, em conjunto com o CGIRS-VJ, o Governo do Estado elaborou projetos que possibilitem medidas para o atendimento da região. Nesse sentido, estão em construção, de acordo com o Plano Regionalizado de Coletivas Seletivas Múltiplas (CGIRS-VJ, 2018), uma Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTR), em Limoeiro do Norte, seis Estações de Transbordo de Resíduos (ETR), com previsão para os municípios de Alto Santo, Iracema, Morada Nova, Palhano, Potiretama e Russas. Além disso, também estão previstas Centrais Municipais de Reciclagem (CMR), que permitem uma redução nos custos da gestão de resíduos e um aumento na vida útil do aterro, ao diminuir a quantidade de materiais depositados nele. Segundo o CGIRS-VJ (2021), o aterro sanitário em Limoeiro do Norte possui tempo de operação estimado em 30 anos, sendo previsto para 2023 o início de recebimento dos RSU.

De acordo com a Secretaria das Cidades (2021), a infraestrutura instalada será conforme os seguintes itens:

- Central de Tratamento de Resíduos (CTR): unidade para tratamento e destinação final de resíduos oriundos dos municípios consorciados, contemplando: aterro sanitário para disposição de rejeitos; unidade de tratamento de resíduos de serviço de saúde (RSS), através de autoclavagem; unidade de tratamento de resíduos da construção civil (RCC), através de trituração; unidade de compostagem de resíduos orgânicos.

- Estação de Transbordo de Resíduos (ETR): unidades de recebimento e armazenamento temporário de resíduos provenientes da coleta regular de municípios distantes mais de 25 km da CTR.

- Central Municipal de Reciclagem (CMR): construídas em cada município, receberá resíduos com potencial de reciclagem e/ou reutilização secos e já segregados na fonte, ou seja, nos domicílios, realizando o beneficiamento prévio e a comercialização desse material e permitindo que seja disposto no aterro sanitário apenas rejeitos.

3.5 Gravimetria dos resíduos gerados no Vale do Jaguaribe

O CGIRS-VJ realizou um estudo de caracterização física dos resíduos dos municípios. O método foi aplicado nas cidades com população superior a 50.000 habitantes. Para os municípios que não estavam nesse cenário, o Consórcio fez uma extrapolação, em que o tamanho da população urbana foi utilizado como fator de semelhança. Os locais escolhidos foram as áreas de disposição final dos resíduos.

Segundo o Plano Regionalizado de Coletas Seletivas Múltiplas (CGIRS-VJ, 2018), a metodologia utilizada para a caracterização gravimétrica foi o quarteamento dos resíduos, definido pela NBR 10.007/2004 como:

Processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes. As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado.

Na Figura 9, são sintetizadas as etapas do processo de quarteamento.



Fonte: Adaptado de Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal (2015)

Ainda segundo o Plano, foi feita uma triagem sobre a amostra para a caracterização física, depois da etapa de quarteamento. Os componentes foram separados de acordo com o

grupo de resíduos ao qual eles faziam parte. Por fim, foi medido o peso da amostra em uma balança digital. O cálculo das porcentagens individuais foi feito segundo a Equação 6:

$$\text{Material (\%)} = \frac{\text{Peso da fração do material (kg)}}{\text{Peso total da amostra (kg)}} * 100 \quad (6)$$

Fonte: CGIRS-VJ (2018)

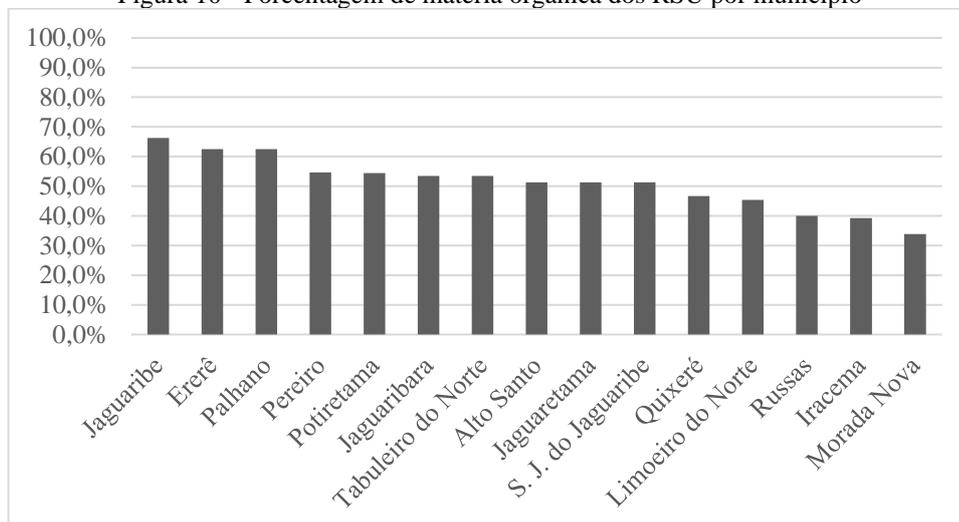
Na Tabela 4, é ilustrada a tipologia estimada dos RSU no Vale do Jaguaribe, e na Figura 10 é exposta, em ordem decrescente, a porcentagem de matéria orgânica observada nos resíduos para cada um dos municípios.

Tabela 4 - Tipologia estimada dos Resíduos Sólidos Urbanos

Município	Metal	Papel/ Papeloão	Plástico Duro	Plástico Mole	Vidro	Matéria Orgânica	Origem Sanitária	Tetrapak
Alto Santo	1,8	7,6	16,3	4,6	6,6	51,3	3,5	0,9
Ererê	1,2	1,5	9,7	3	0	62,5	19,3	0
Iracema	1,6	6,6	17,1	13,7	0,7	39,2	16,2	0
Jaguaretama	1,8	7,6	16,3	4,6	6,6	51,3	3,5	0,9
Jaguaribara	2,5	5,8	9,1	7,4	2,2	53,5	17,4	0
Jaguaribe	1,3	2,6	14,3	1,6	0,6	66,3	11,8	0
Pereiro	1,9	4,2	14,9	1,8	4,4	54,6	5,2	0
Potiretama	1,8	1,8	14,6	3,8	4,4	54,4	17,1	0
Palhano	1,2	1,5	9,7	3	0	62,5	19,3	0
Morada Nova	5	4	20,2	6,4	1,8	33,9	28,7	0
Limoeiro do Norte	1,2	3	17	5,8	2	45,4	21,7	1,4
Quixerê	2,2	12,4	10,7	8,9	3,1	46,7	11,2	0
Russas	4	6,8	12,8	13,6	4	40	7,2	0
São João do Jaguaribe	1,8	7,6	16,3	4,6	6,6	51,3	3,5	0,9
Tabuleiro do Norte	2,5	5,8	9,1	7,4	2,2	53,5	17,4	0
Tipologia Média Estimada da Região	2,12	5,25	13,87	6,0	3,0	51,1	13,67	0,27

Fonte: CGIRS-VJ (2018)

Figura 10 - Porcentagem de matéria orgânica dos RSU por município



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do CGIRS-VJ (2021)

3.6 Projeção populacional

Conforme exposto em “2.1 Políticas públicas de gestão de resíduos sólidos e as projeções populacionais”, e com a disposição e análise dos dados disponíveis, foi construída uma tabela, que se encontra no Apêndice A, com a série histórica populacional para cada município do Vale, segundo os valores dos censos do IBGE, de 1950 até a projeção feita pelo Instituto em 2020. Em 1950, apenas alguns municípios do Vale do Jaguaribe existiam e tiveram suas populações registradas e o mesmo ocorreu em anos seguintes.

Entretanto, de acordo com o método descrito pelo IPCC (1996), para fins da estimativa de cálculo da quantidade de biogás emitida, a população a ser considerada é somente a urbana. Conforme citado anteriormente, a dinâmica populacional de uma região pode ser afetada por diferentes fatores, de modo que sua projeção de habitantes seja alterada por consequência.

Segundo o MMA (2016), através do documento “Orientações para elaboração de plano simplificado de gestão integrada de resíduos sólidos – PSGIRS”, os modelos de projeção populacional mais usuais são: método aritmético, método geométrico e método dos mínimos quadrados. Ainda conforme a publicação, a escolha da estimativa de população deve ser feita de acordo com a curva que melhor se ajusta à curva dos censos demográficos. Além disso, como exposto por Tsutiya (2006), a projeção aritmética é recomendada apenas para previsão populacional de um período pequeno, entre 1 e 5 anos. Dessa forma, foi escolhido o modelo geométrico de projeção.

Ainda segundo Tsutiya (2006, p.39), o modelo geométrico pressupõe que o crescimento da população é proporcional à população existente em um determinado ano. O método pode ser representado através das Equações 7 e 8:

$$k_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

Fonte: Tsutiya (2006)

$$P = P_2 \times e^{k_g \times (t - t_2)} \quad (8)$$

Fonte: Tsutiya (2006)

Onde:

k_g = Taxa de crescimento demográfico, baseando-se nos dois últimos censos

P_1 = População no penúltimo censo

P_2 = População no último censo

t_1 = Ano do penúltimo censo

t_2 = Ano do último censo

t = Ano da projeção

P = População estimada

Nesse contexto, como não houve censo demográfico do IBGE em 2020, não é possível verificar a população urbana dos municípios, restando então os censos dos anos 2000 e 2010 para isso. O Instituto supracitado, com seus métodos de projeção e ajustes, realizou uma estimativa populacional para 2020, porém, não há distinção entre população urbana e rural.

Dessa forma, a estimativa da população urbana em 2020 foi feita considerando a taxa de crescimento demográfica no período 2010-2020, uma vez que esses valores são mais próximos da atual realidade dos municípios da região.

3.7 Estimativa da produção de biogás

Antes que seja feita uma projeção do potencial de emissão de biogás dos municípios do Vale do Jaguaribe, é preciso determinar a estimativa da geração de resíduos para cada cidade do estudo. De acordo com o Governo do Estado Ceará (2015), a produção per capita dos RSU no Estado varia entre 0,72 a 2,24 kg/habitante/dia, conforme a população. A produção de RSU para cada município da região, de acordo com sua população, está disposta no Apêndice B.

Como exposto em “2.8 Estimativa do potencial de emissão de biogás”, a projeção será feita de acordo com o modelo descrito pelo IPCC (1996). Para o cálculo do *COD*, utiliza-se a Equação 3, sendo necessária a composição gravimétrica de cada município, que está exposta na Tabela 4. Já que não havia distinção na tabela de composição dos RSU elaborada pelo CGIRS-VJ, decidiu-se juntar os fatores B (resíduos de jardinagem e outros materiais orgânicos não alimentícios) e C (resíduos orgânicos alimentícios). Dessa forma, $B+C=0,16$. Além disso, o valor do fator E (madeiras e resíduos florestais) seguiu o estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014, p. 20), que determina seu escore em 1% da composição dos RSU no Brasil.

Posteriormente, determina-se o L_0 , que representa o potencial de geração de metano dos RSU, em t de CH_4 /t de RSU, de acordo com a Equação 2. O *FCM*, ou fator de correção de metano (%), tem valor 1 para situação de aterro sanitário, de acordo com IPCC (1996a, p. 3.14).

O termo COD_f é a quantidade de carbono disponível para a decomposição bioquímica e, conforme Bingemer e Crutzen (1987, p. 1), varia com a temperatura na faixa anaeróbia do aterro. Nesse contexto, admite-se que a temperatura permanecerá constante em 35°C, segundo IPCC (1996b, p. 6.9). Portanto, COD_f pode ser expresso como:

$$COD_f = (0,014 \times T) + 0,28 \quad (9)$$

Para F , que indica a fração de metano no biogás, o parâmetro utilizado foi 50%, já para o fator de oxidação de metano na superfície do aterro (OX), considera-se o valor zero, de acordo com IPCC (2006, p. 3.15). Além disso, ainda segundo IPCC (2006, p. 3.19), o valor a ser utilizado para a quantidade de metano recuperado (R) também é zero. A densidade do metano é igual a 0,717 kg/m³, conforme United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2017, p.9). O termo $\frac{16}{12}$ representa a conversão de carbono para metano.

No Ceará, não há uma meta definida para a porcentagem de RSU que devem ser destinados para aterros sanitários, somente uma com a totalidade dos municípios. Em até 15 anos, os lixões de todos os municípios devem ser encerrados, conforme o Plano Estadual de Resíduos Sólidos. Dessa forma, considerou-se dois cenários, tendo como base as informações do PNRS.

- Cenário 1: 60% dos RSU terão como destinação final os aterros sanitários, tendo como base o avanço do Estado nas políticas públicas de gestão de resíduos, já citado anteriormente, e a construção da CTR para atender a região estudada. Sendo assim, $RSU_f = 0,6$.

- Cenário 2: Nessa projeção, é considerado que 100% dos RSU serão depositados em aterros sanitários. Ou seja, $RSU_f = 1$.

Na Tabela 5, os parâmetros de cálculo considerados são expostos.

Tabela 5 - Valores considerados nos parâmetros das equações

Parâmetro	Abreviatura	Valor
Fator de correção de metano	FCM	1
Quantidade de carbono disponível	COD _f	0,77
Fração de metano no biogás	F	0,5
Fração de RSU em aterros	RSU _f	0,6 ou 1
Metano recuperado	R	0
Fator de oxidação de metano na superfície do aterro	OX	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

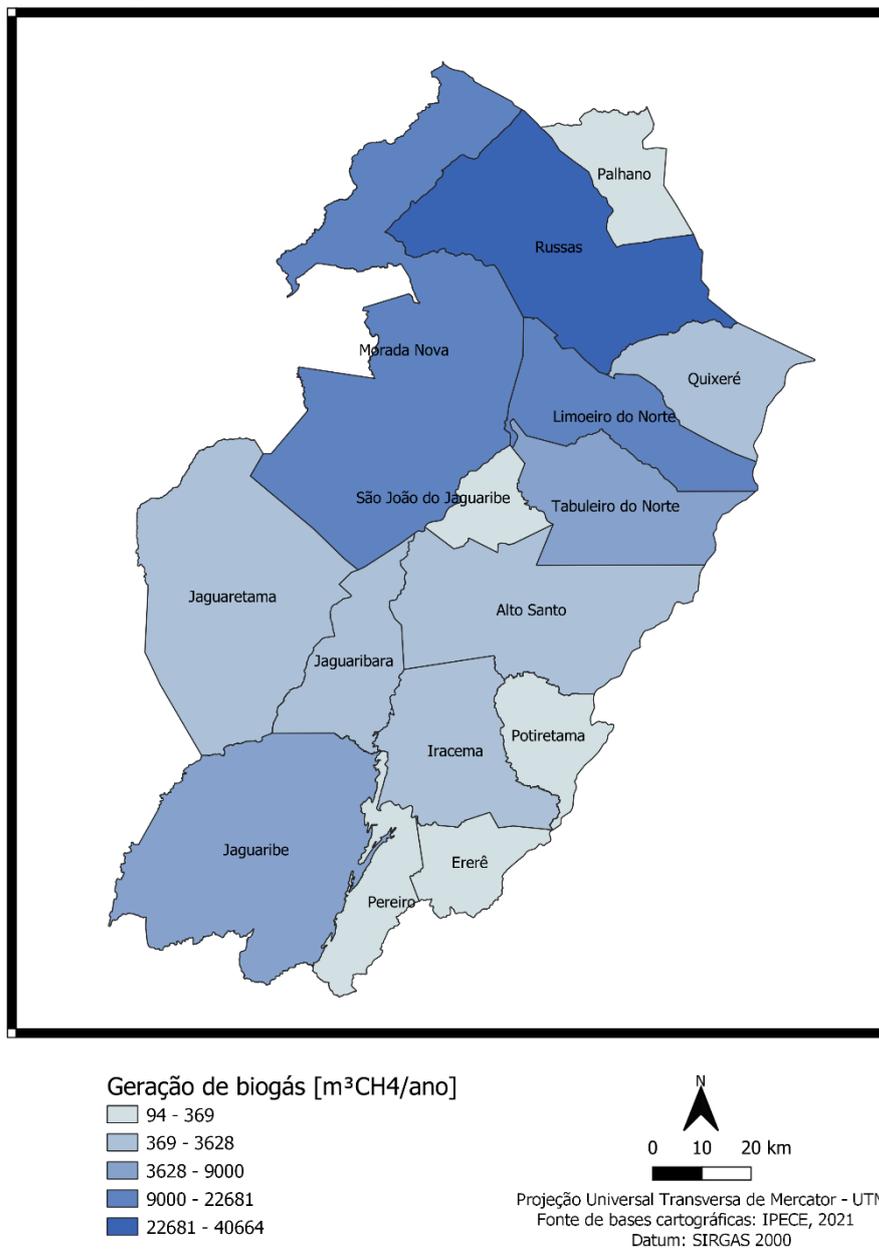
3.8 Apresentação dos resultados

Para auxiliar na disposição dos resultados obtidos, foi utilizado o QGIS, um Sistema de Informação Geográfica, que permite, dentre outras funções, a criação e manipulação de mapas. Na presente pesquisa, quanto maior o grau de intensidade da cor do município, maior será a sua estimativa. Na criação da legenda, foi utilizado o modo de quebra natural (jenks) do próprio programa.

4 RESULTADOS

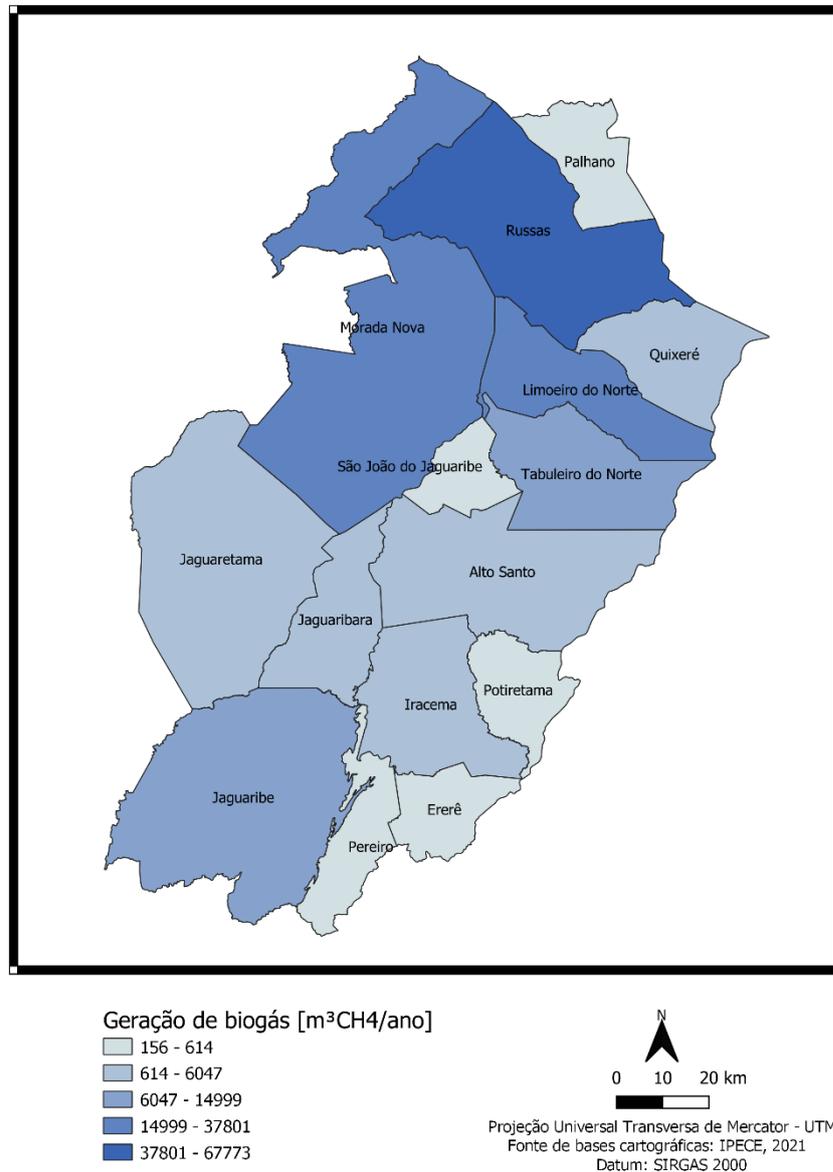
Com base nos parâmetros apresentados neste trabalho, a exemplo do populacional ilustrado no Apêndice A, determinou-se a vazão de metano (m^3/ano), de 2025 até 2053, em dois cenários, além do potencial de geração de energia elétrica dos municípios. Os valores populacionais considerados para o cálculo estão no Apêndice A. Com base nos dois últimos censos, observou-se o crescimento da população de alguns municípios, além da estabilidade nos valores de alguns, ou até mesmo queda de acordo com a projeção. Os maiores valores são observados nos municípios de Russas, Morada Nova e Limoeiro do Norte. Em 2025, por exemplo, seus potenciais de geração de biogás serão, respectivamente, 40.664, 22.681 e 21.706 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$, no cenário 1. Nesse mesmo ano, o total para os 15 municípios do Vale do Jaguaribe será de 110.545 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$. Na Figura 11 é apresentada, para cada componente do Vale do Jaguaribe, a estimativa para 2025, considerando o cenário 1. O cenário 2 está representado na Figura 12.

Figura 11 - Estimativa da geração de biogás – 2025 – Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

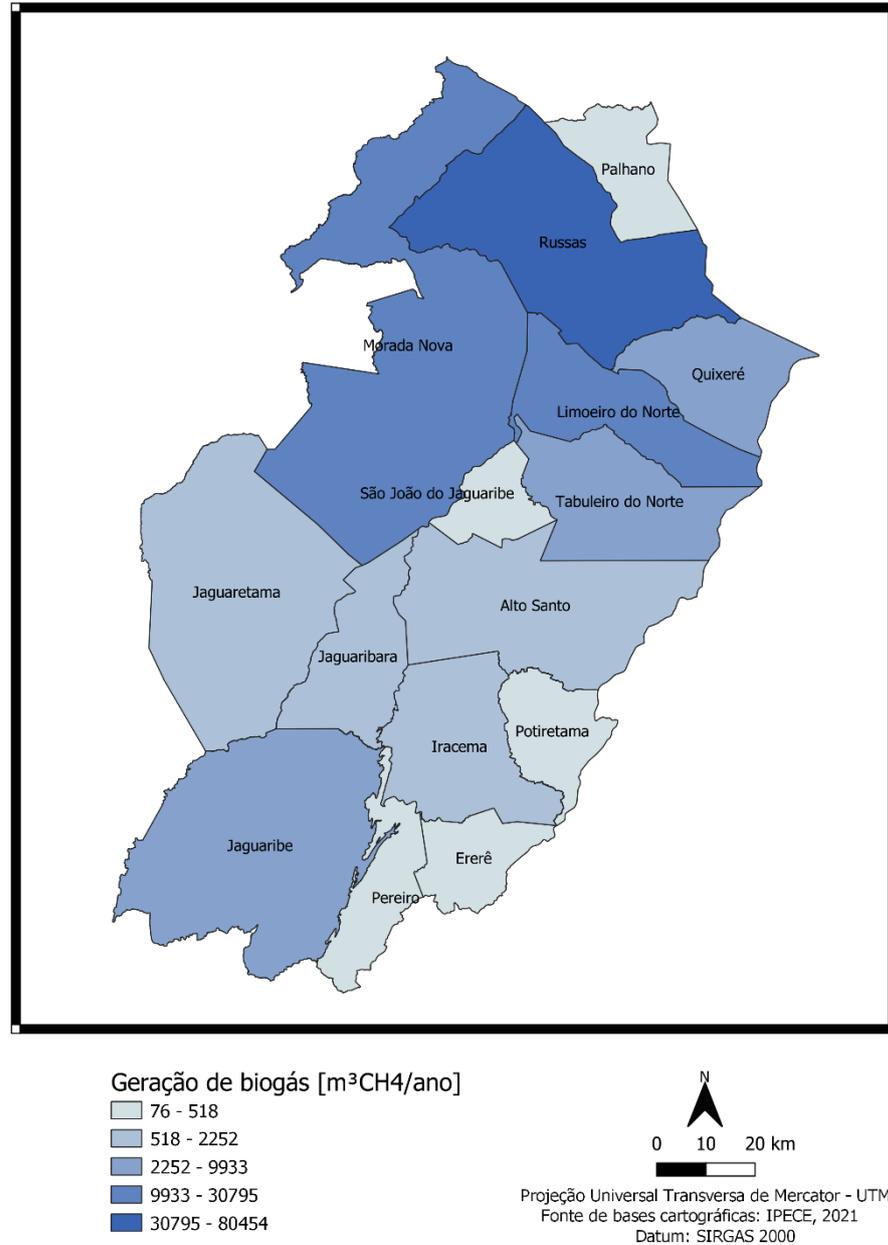
Figura 12 - Estimativa da geração de biogás – 2025 – Cenário 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

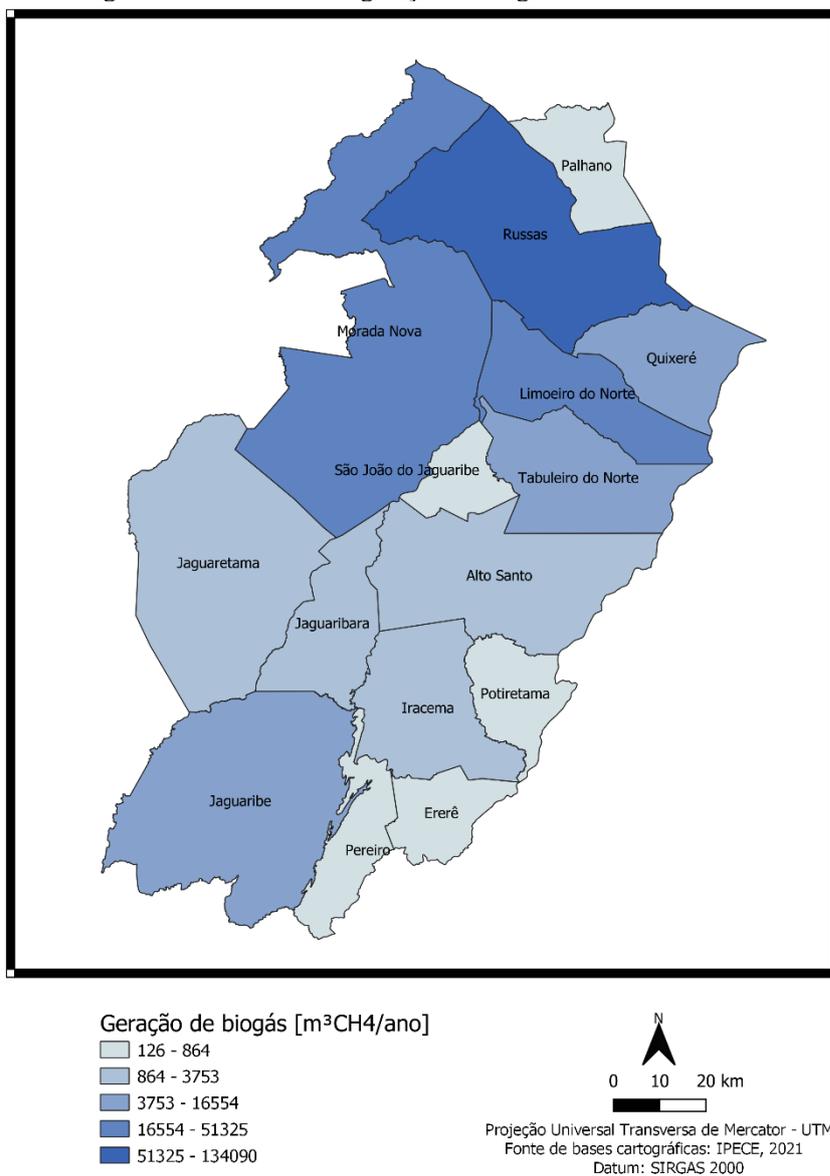
Observando a Figura 11, percebe-se a ocorrência de uma variação na geração de 94 a 40.664 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$. Essas diferenças ocorrem devido à variabilidade de características dos municípios. Porém, a que possui maior influência no potencial é o fator população urbana, uma vez que a geração de resíduos sólidos urbanos é diretamente proporcional a ela, segundo as equações fornecidas por IPCC (1996). No somatório de todos os municípios, o cenário 2 representou um aumento de 66% quando comparado ao cenário 1. Na Figura, 13, são abordados os mesmos parâmetros, porém para o cenário 1 no ano de 2053. Na Figura 14, é possível verificar a estimativa para o 2º cenário.

Figura 13 - Estimativa da geração de biogás – 2053 – Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

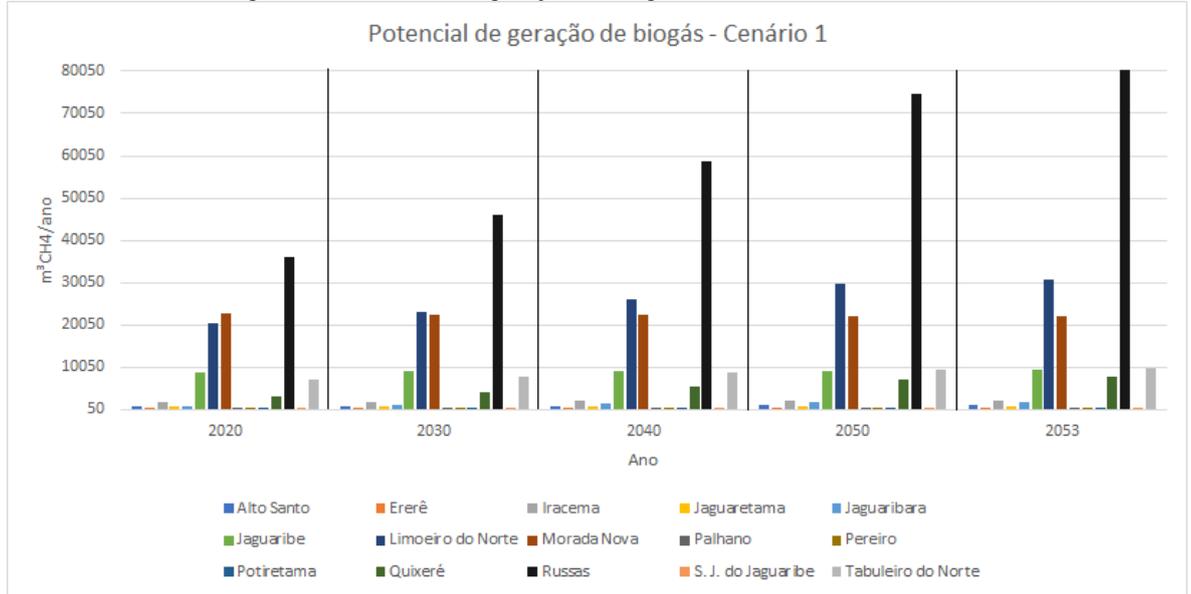
Figura 14 - Estimativa da geração de biogás – 2053 – Cenário 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

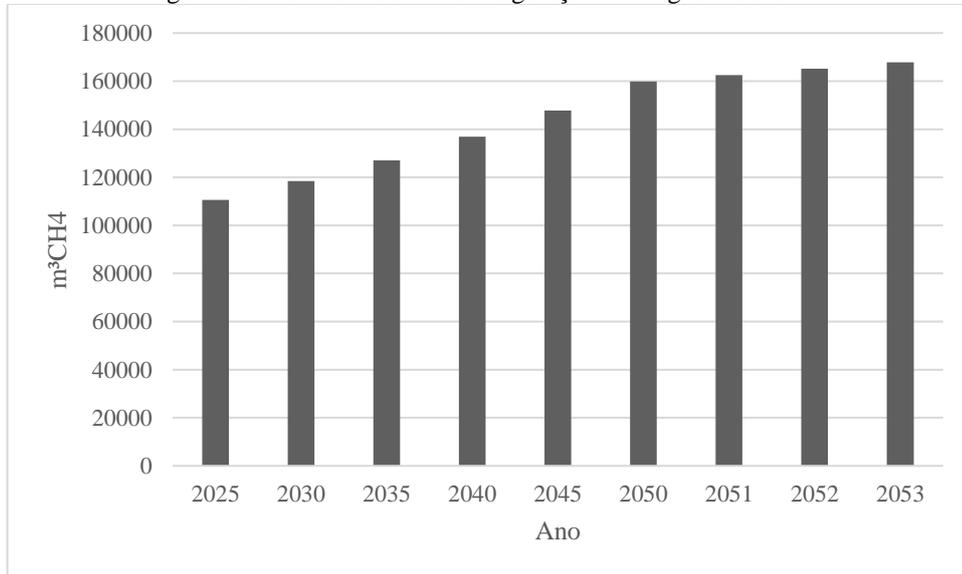
Nas Figuras 15 e 16 são ilustradas, respectivamente, a estimativa de emissão ao longo dos anos, e a evolução do valor total estimado para a região.

Figura 15 - Potencial de geração de biogás – Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

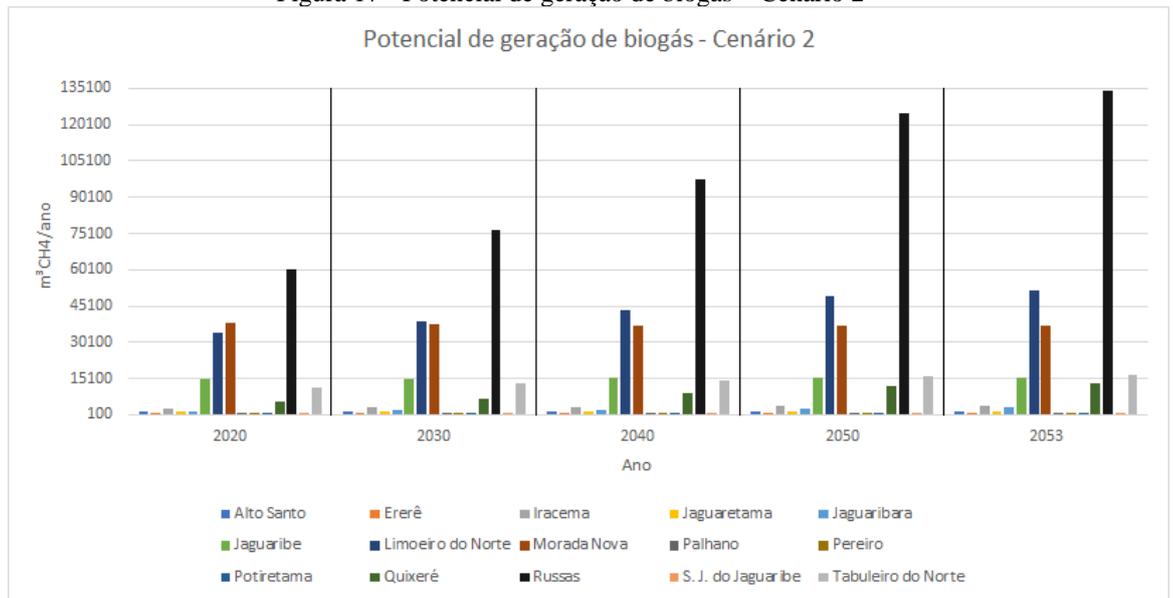
Figura 16 - Estimativa do total de geração de biogás – Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

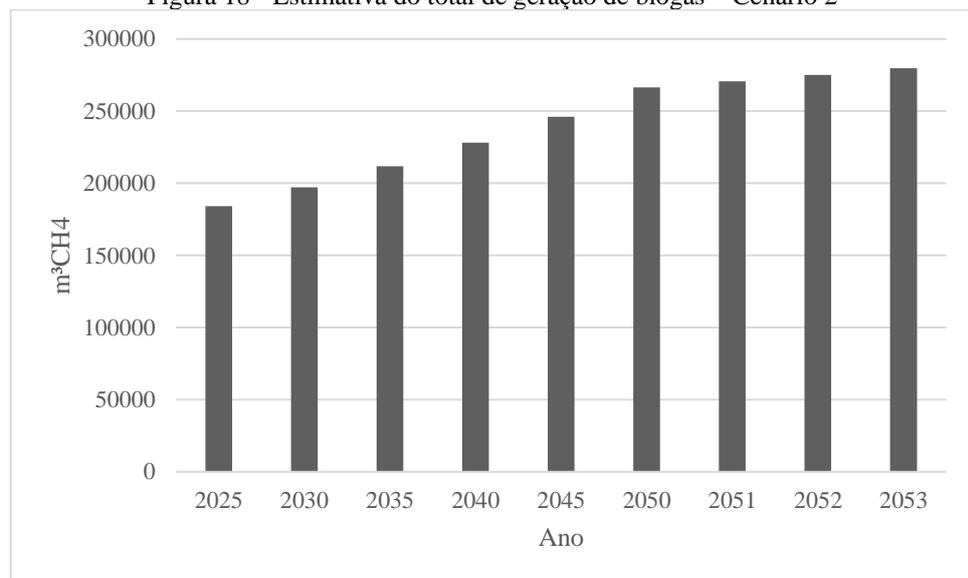
Nas imagens 17 e 18, são apresentadas as mesmas estimativas anteriores, porém para o 2º cenário.

Figura 17 - Potencial de geração de biogás – Cenário 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 18 - Estimativa do total de geração de biogás – Cenário 2

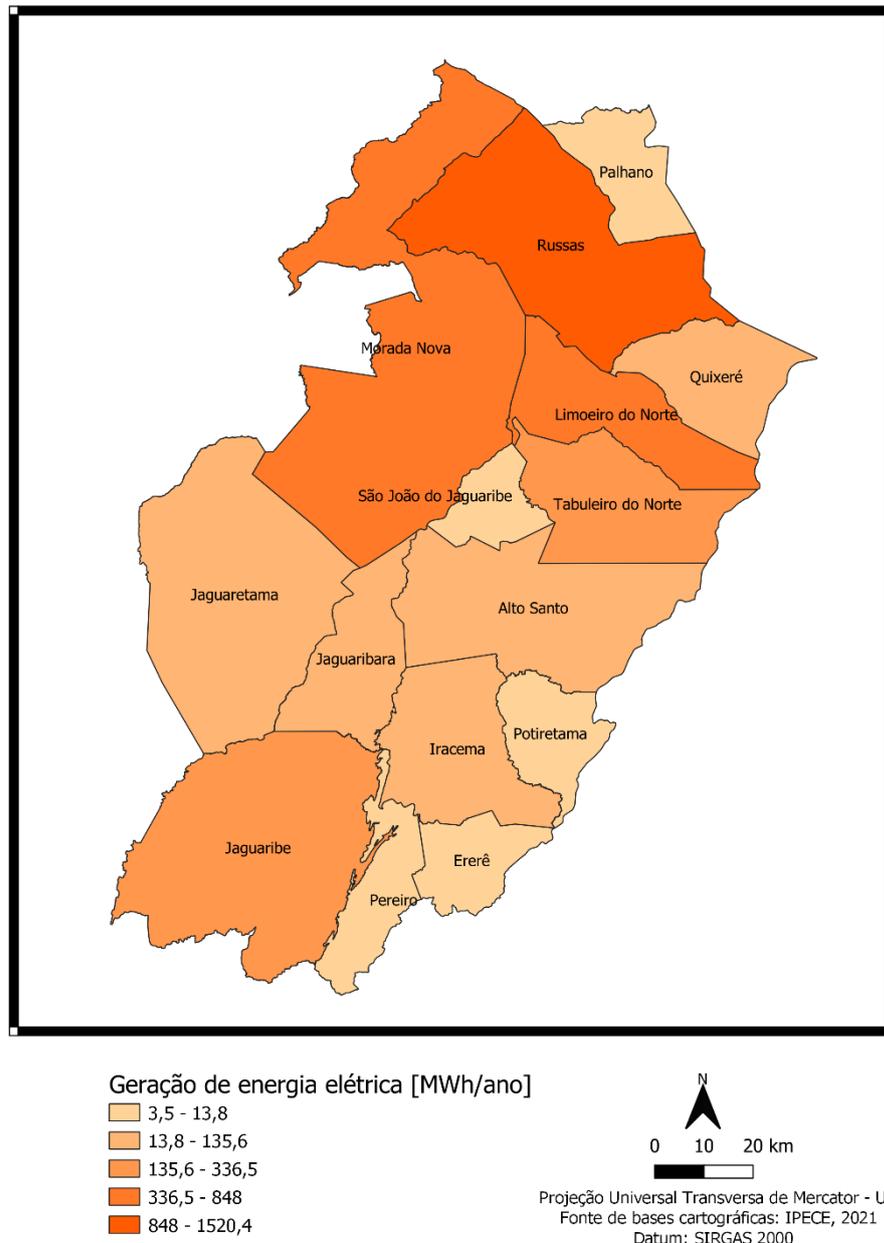


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Diante dos dados mostrados, é possível observar que alguns municípios, como Morada Nova e São João do Jaguaribe, tiveram diminuição em suas estimativas. Esse comportamento é esperado, já que suas populações, conforme a projeção proposta por Tsutiya (2006) e explicada na metodologia, apresentam tendência de queda, tendo como base os últimos censos demográficos do IBGE. Ainda assim, em 2053, a estimativa para a geração total de biogás da região, nos parâmetros do cenário 1, é de 167.817 m³CH₄/ano, e de 279.695 m³CH₄/ano no cenário 2. Esses valores representam um aumento de 52% em relação a 2025.

No contexto da geração de energia elétrica, também foram considerados dois cenários para os municípios. De acordo com as equações sugeridas por ICLEI (2009), o potencial energético cresce proporcionalmente à emissão de biogás. Em 2025, para o cenário 1, o total da estimativa para os municípios da região será de 4.133 MWh/ano. Nesse mesmo ano, considerando o cenário 2, será de 6.889 MWh/ano. As estimativas para cada município estão expostas nas Figuras 19 e 20.

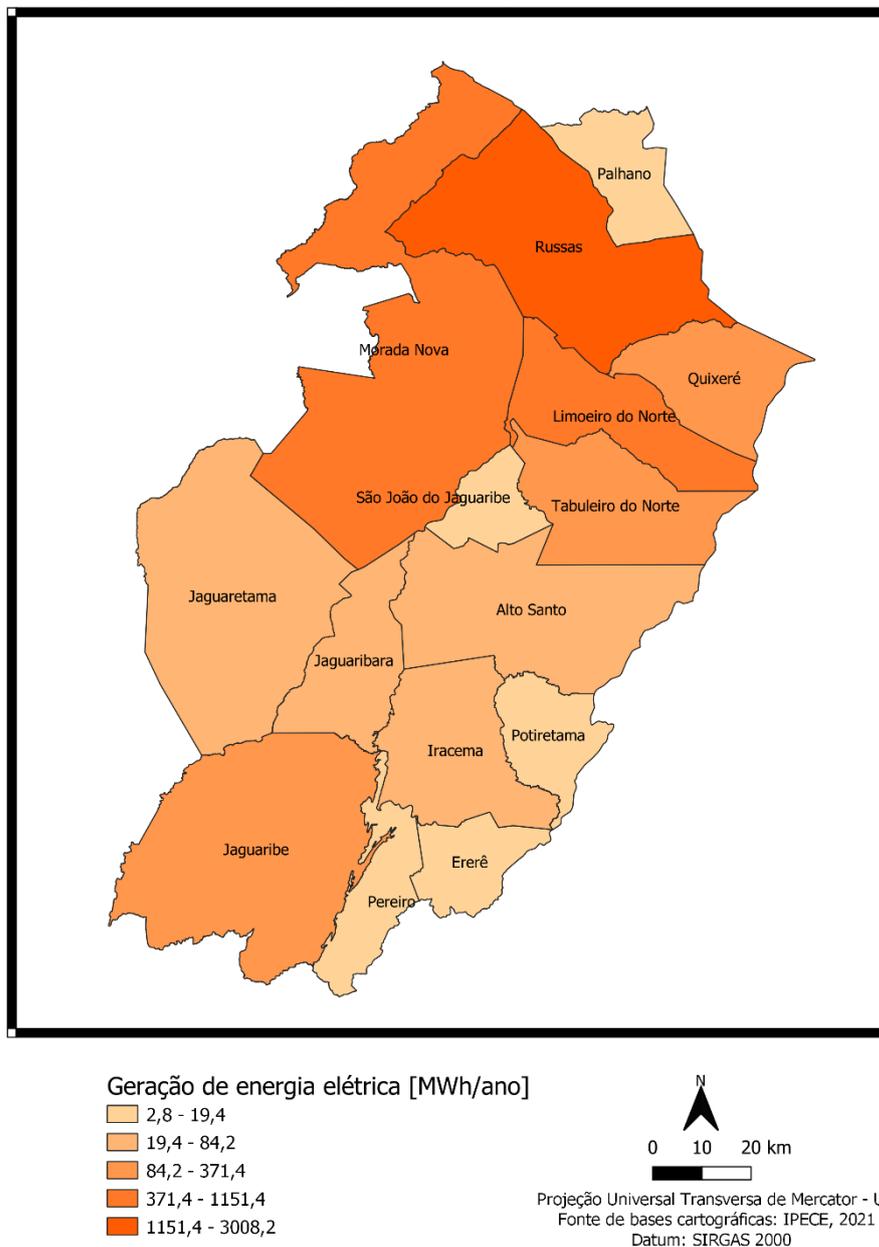
Figura 19 - Estimativa da geração de energia elétrica – 2025 – Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

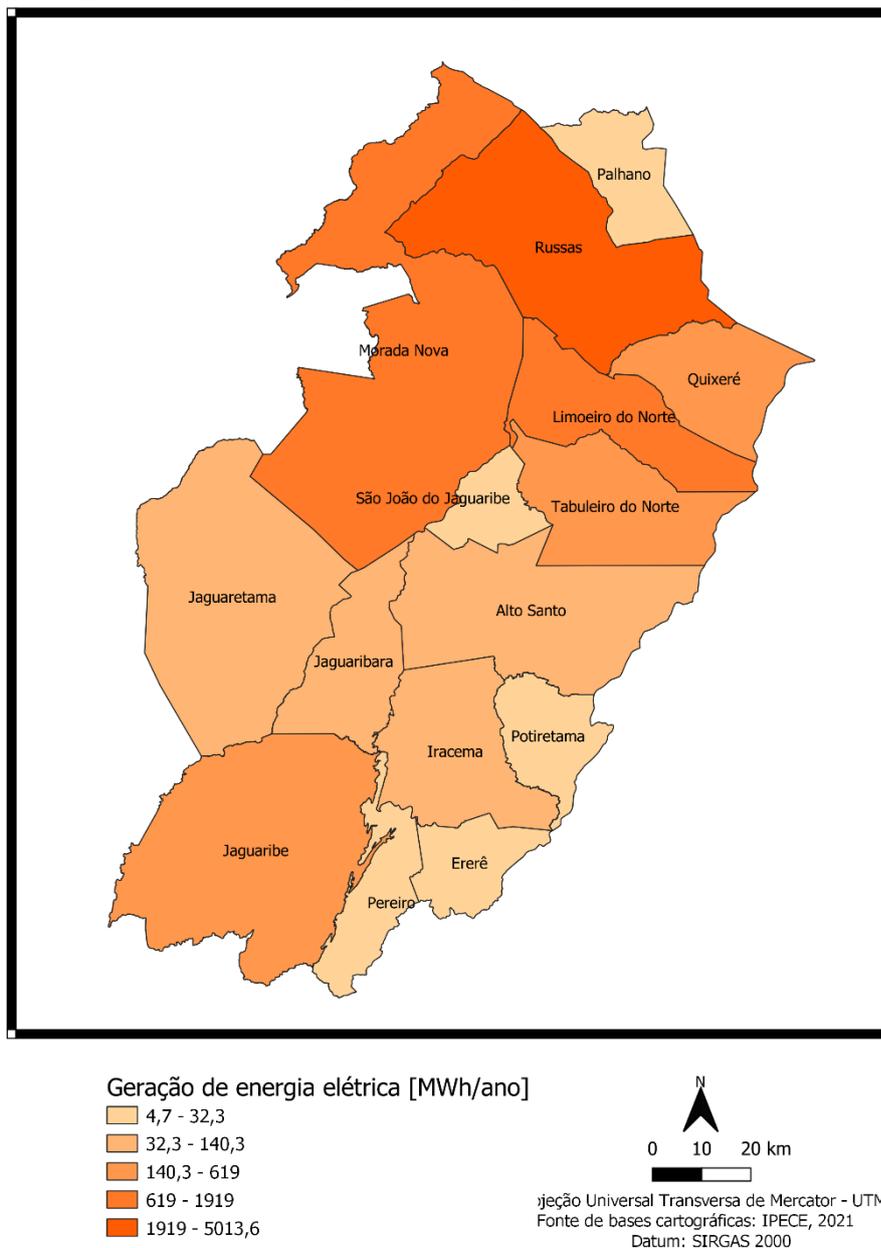
Já para o ano de 2053, são estimados 6.275 MWh/ano, no cenário 1, e 10.458 MWh/ano no 2º cenário. Nas Figuras 21 e 22, são expostos esses dados.

Figura 21 - Estimativa da geração de energia elétrica – 2053 – Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

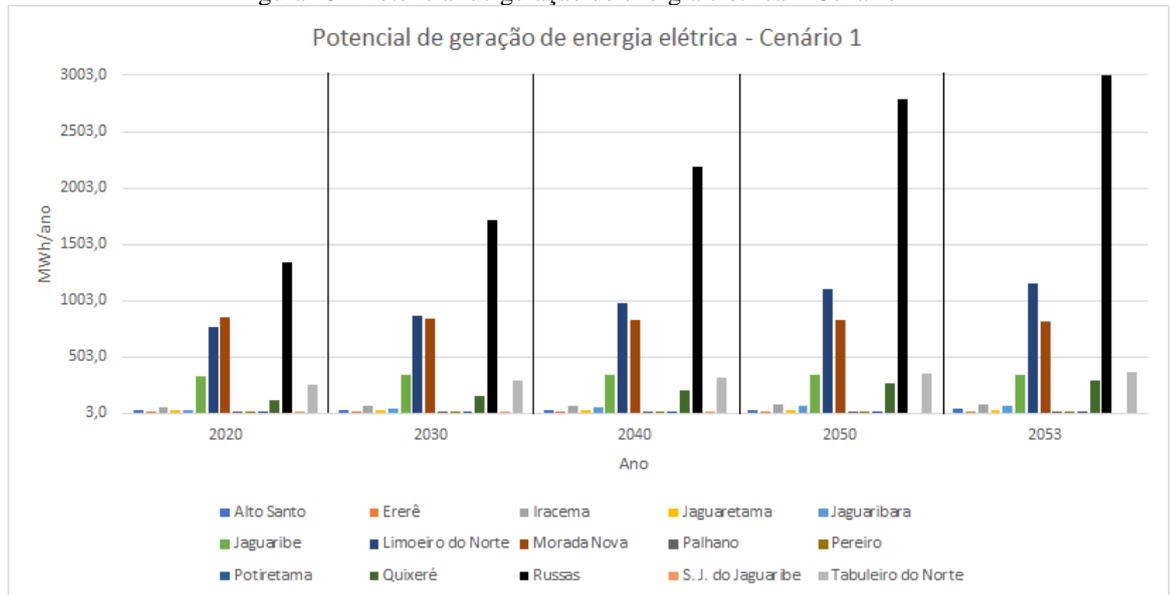
Figura 22 - Estimativa da geração de energia elétrica – 2053 – Cenário 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

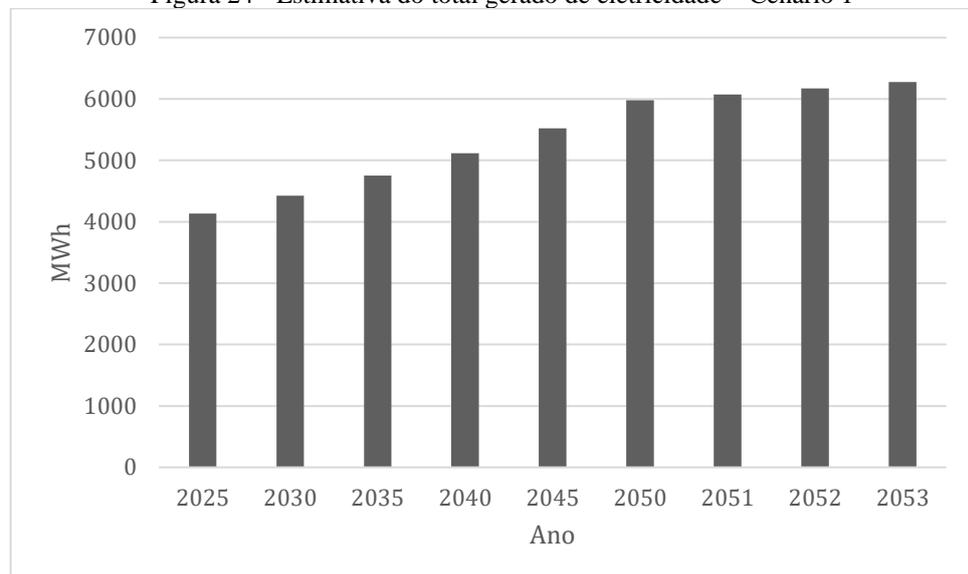
É mostrada, na Figura 23, a estimativa da geração de energia elétrica, e na Figura 24 é apresentado o valor total, considerando todos os municípios da região estudada.

Figura 23 - Potencial de geração de energia elétrica – Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

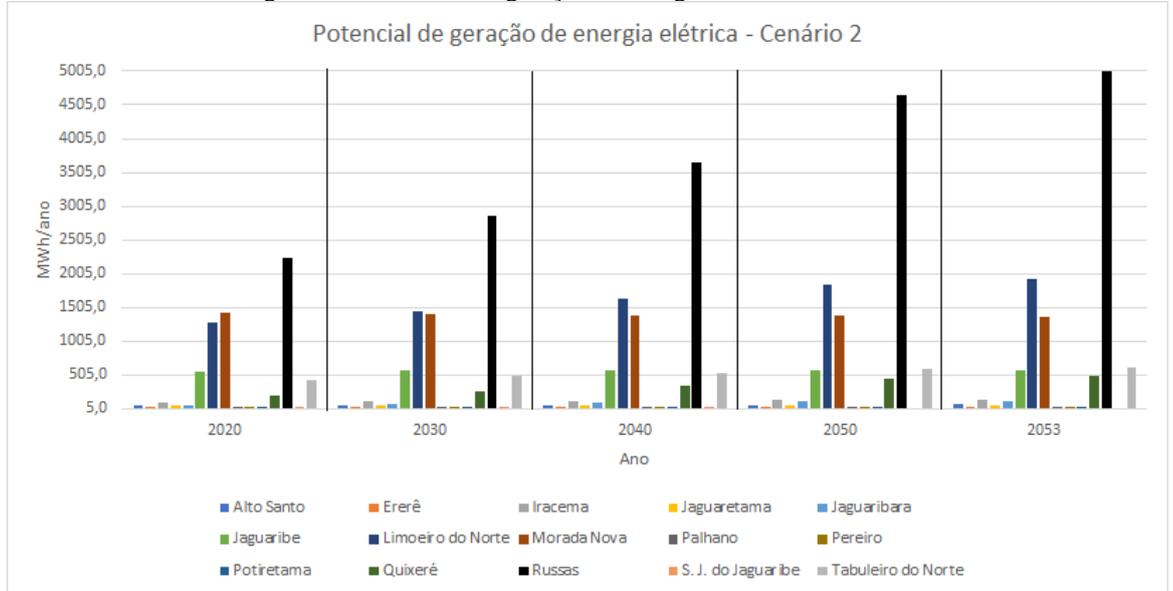
Figura 24 - Estimativa do total gerado de eletricidade – Cenário 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

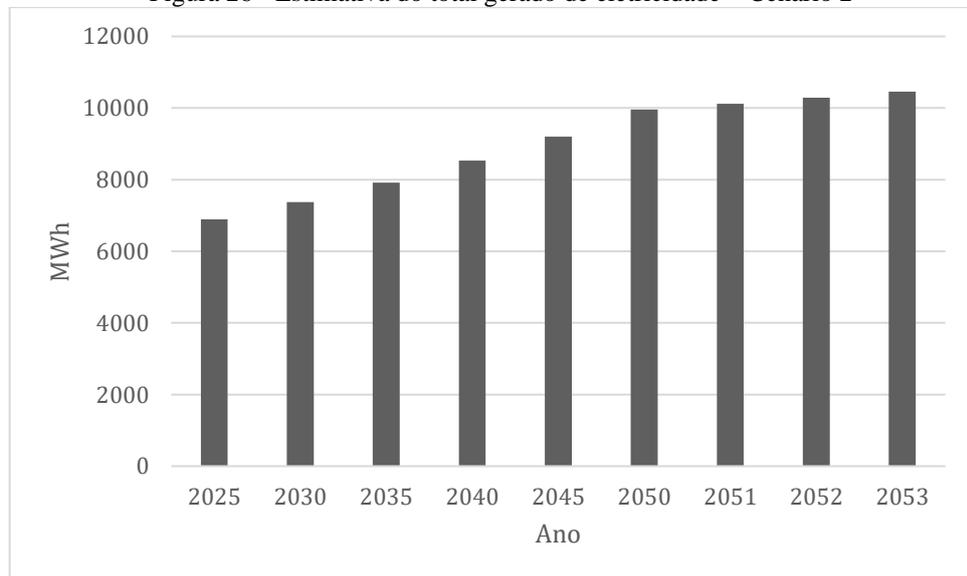
Já nas Figuras 25 e 26, são demonstradas, para o 2º cenário, as mesmas estimativas anteriores.

Figura 25 - Potencial de geração de energia elétrica – Cenário 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 26 - Estimativa do total gerado de eletricidade – Cenário 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Assim como observado na estimativa da emissão de biogás, alguns municípios, a exemplo de Morada Nova e São João do Jaguaribe, possuem tendência de queda. Porém, a maioria dos componentes da região apresentou evolução na projeção. Conforme o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (MME, 2020), o consumo médio residencial no Ceará é de 130

kWh/mês. Dessa forma, considerando o cenário 1, em 2025 seria possível atender a demanda de 2.610 residências. Para 2053, mantendo o consumo médio por residência, é estimado o atendimento de 3.961 residências.

Já para o cenário 2, em 2025 seriam atendidas 4.349 famílias. Em 2053, seria possível suprir a demanda de 6.602 residências. Essa energia, porém, pode ter outras destinações, um exemplo disso é a sua utilização para manutenção do próprio aterro.

Em comparação com outras pesquisas da área, verificou-se uma variação esperada dos resultados. Nascimento (2017) estimou para João Pessoa-PB, a geração de 1.958.416 m³CH₄ para 2010, ano em que a cidade possuía 723.515 habitantes. Já Mata (2012), projetou o potencial de geração de energia elétrica em 16.790 MWh/ano, para uma população de 500.000 habitantes, considerando a cidade de Betim-MG e região. Dessa maneira, observa-se que cada estimativa é muito específica e depende de diversos fatores da população e da região. Os valores, portanto, podem ser divergentes da realidade.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante do que foi exposto neste trabalho, nota-se que uma gestão ampla de resíduos sólidos urbanos é de fundamental importância para que, dessa maneira, o meio ambiente seja garantido como um bem de uso coletivo do povo e essencial à qualidade de vida sadia. Nesse sentido, as esferas públicas, em conjunto com a sociedade, devem agir para promover práticas responsáveis, como o consumo consciente e a destinação final adequada de resíduos.

No contexto da gestão de RSU no Vale do Jaguaribe, essas ações ainda não se mostram muito presentes, apesar de o Estado do Ceará ter aprovado, antes mesmo da promulgação da Lei Federal, uma Política Estadual de Resíduos Sólidos, que aborda as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Entretanto, com a construção do aterro consorciado do COMARES-UL (Consórcio Municipal para Aterro de Resíduos Sólidos – Unidade Limoeiro do Norte), a tendência é de melhoria.

Nesse cenário, a disposição de RSU em aterros sanitários se mostra como uma das principais alternativas para a solução da problemática dos lixões, que geram danos socioambientais para a região e para as pessoas que estão inseridas nesse processo. Após a destinação dos resíduos em local adequado, é possível aproveitar o biogás produzido na

decomposição anaeróbia da matéria orgânica para geração de energia, contribuindo, para além de outros benefícios, com a redução da emissão de gases do efeito estufa.

Em posse dos dados de composição gravimétrica dos municípios da região, as equações fornecidas pelo IPCC para a estimativa da quantidade de metano emitida são claras e objetivas. Além disso, visando estimar o potencial de geração de energia elétrica, as expressões sugeridas por ICLEI também apresentam as mesmas características. Foram necessários somente alguns ajustes de unidades, para melhor compreensão dos resultados.

Por meio do trabalho, foi estimada a geração de 6.275 MWh para o ano de 2053, considerando o cenário 1. Já para o cenário 2, no mesmo ano, a estimativa foi de 10.458 MWh. Esses valores são condizentes com a população urbana da região, e a quantidade de matéria orgânica em seus resíduos. Portanto, caso haja aproveitamento energético no aterro sanitário, a região pode ser beneficiada de diversas formas, seja no fornecimento para a população, na diminuição da dependência de concessionárias, ou mesmo para operação do próprio aterro sanitário.

Para trabalhos futuros, é sugerido um estudo sobre o cenário da geração de energias renováveis no Ceará, abordando como o Estado se encontra atualmente, e seu potencial. Além disso, pode ser feita uma pesquisa tratando dos impactos e a influência gerados pela construção do aterro consorciado do COMARES-UL, apresentando aspectos socioambientais e econômicos do empreendimento.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. p. 1.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997. p. 3.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1992. p. 1-5.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2018.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2015.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2020.

ALEM SOBRINHO, P.; TSUTIYA, M. T. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. São Paulo: Winner Graph, 1999.

AUGENSTEIN, D.; PACEY, J. **Modelling landfill methane generation**. Proceedings of the Third International Landfill Symposium, Sardinia, Italy, 1991.

BINGEMER, H. G.; CRUTZEN, P. J. The production of methane from solid wastes. **In: Journal of geophysical research**, vol. 92, nº D2. 1987. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JD092iD02p02181>>. Acesso em: 9 fev. 2021

BRASIL. **Constituição (1988)**. Art. 225.

_____. **Lei 12.305. Política Nacional dos Resíduos Sólidos**. Art. 4. 2010.

_____. Lei 6.398. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Art. 4. 1981.

_____. **Resolução 01 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA**. 1986.

BRINGHENTI, J. **Coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos: aspectos operacionais e da participação da população**. 2004. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental). Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em:

<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-07122009-091508/publico/JacquelineBringheti.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2020

BRITO FILHO, L.F. **Estudo de gases em aterros. Casos: Nova Iguaçu e Terra Brava**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CASTILHOS, J. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Florianópolis, 2003.

CATAPRETA, C. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. 2008. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CEARÁ. Lei 13.103. **Política Estadual de Resíduos Sólidos**. 2001. Disponível em: <<https://belt.al.ce.gov.br/index.php/legislacao-do-ceara/organizacao-tematica/meio-ambiente-e-desenvolvimento-do-semiarido/item/3051-lei-n-13-103-de-24-01-01-d-o-05-02-01-revogada-pela-lei-n-16-032-de-20-06-16>>. Acesso em: 6 set. 2020

_____. Lei 15.086. **Selo verde e outras providências**. 2011. Disponível em: <<https://belt.al.ce.gov.br/index.php/legislacao-do-ceara/organizacao-tematica/meio-ambiente-e-desenvolvimento-do-semiarido/item/3080-lei-n-15-086-de-28-12-11-do-30-12-11>>. Acesso em: 6 set. 2020

_____. **Lei complementar 154**. 2015. Disponível em: <https://www.cidades.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/12/2013/01/lei_complementar_no154_20-10-2015.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2020

CGIRS-VJ. Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - Vale do Jaguaribe. **Plano regionalizado de coletas seletivas múltiplas**. Limoeiro do Norte, 2018. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1ldlxuUHiAMn_ZXcKkAEIf5O5zV4tqt4n/view>. Acesso em: 5 mai. 2020

CINTRA, F. H.; HAMADA, J.; FILHO, G. S. C. **Fatores que afetam a qualidade do chorume gerado em aterro controlado de resíduos sólidos urbanos**. In: Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 6, Vitória, 2002.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas/SP**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de Campinas, UNICAMP. Campinas, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264904>>. Acesso em: 14 abr. 2020

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota técnica DEA 18/14. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2020

FERREIRA, W. R. **Análise do potencial energético territorial do biogás proveniente de aterros sanitários para inserção na matriz elétrica do estado de Minas Gerais no horizonte de 2050**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AYJKUR>>. Acesso em: 29 mai. 2020

GALBIATI, A. F. **O Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos e a Reciclagem**. Campo Grande, 2008. Disponível em: <<http://www.limpezapublica.com.br/textos/97.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2020

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. 2004. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://antigo.ppe.ufRJ.br/ppes/production/tesis/rachelh.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2020.

HINRICHS, R.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

HIRANO, M. Y. **Geração de energia por microturbina alimentada à biogás em uma propriedade rural - Estudo de caso**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, UNESP. Bauru, São Paulo. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/132611>>. Acesso em: 17 abr. 2020

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **Pesquisa de Orçamentos Familiares**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101670.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2020

ICLEI. Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento de biogás. Volume 1 – Aterros sanitários**. São Paulo, 2009.

IPCC. INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Inventories**. 2006. Disponível em:< <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>>. Acesso em: 5 mai. 2020

_____. INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual (Vol.3)**. 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>>. Acesso em: 5 mai. 2020

_____. INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual - Vol. 3. Waste - Chapter 6**. Mexico City: 2003.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **As regiões de planejamento do Estado do Ceará**. Fortaleza, 2015. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2014/02/TD_111.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

_____. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Caracterização territorial do Estado do Ceará**. Fortaleza, 2012.

ITURRI, E. A. Z. Uma proposta para a base de apoio dos drenos de gás. **Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamentos de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 2006.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo**. São Paulo, 2011. p. 135-137. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142011000100010>. Acesso em: 6 abr. 2020

KHOIYANGBAM, R. S.; GUPTA, N.; KUMAR, S. **Biogas Technology: Towards sustainable development**. New Delhi: The Energy and Resources Institute - Teri, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/261136066_Biogas_Technology_towards_sustainable_development>. Acesso em: 14 abr. 2020

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. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5213/1/arquivo2422_1.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2020

MATA, O. J. **Estimativa da produção de biogás no aterro sanitário de Betim-MG**. Universidade José do Rosário Vellano, Alfenas, 2012.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – Redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro, 2007. p. 18-21.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Simplificado de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PSGIRS**. Brasília, DF, 2016.

MME. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Propostas das instituições presentes na reunião de construção do renovabio biocombustíveis biogás e biometano**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=87ed2d4e-5a4a-db52-5d0b-737d2662ac9c&groupId=36224>. Acesso em: 25 abr. 2020

_____. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Brasília, DF, 2020.

NASCIMENTO, D. P. **Aplicação do método IPCC para estimação da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa/PB**. III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS. Fortaleza, Ceará 2017.

NOGUEIRA, L.A.H. **Biodigestão, a alternativa energética**. São Paulo: Editora Nobel, 1986.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia). Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/001542064>>. Acesso em: 8 abr. 2020

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS. **The description of a well, and Earth in Lanchashire, taking fire by a candle approached to it**. 1666, p. 482. Disponível em:

<<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/2/23-32/482.1.full.pdf+html>>. Acesso em: 16 abr. 2020

SECRETARIA DAS CIDADES. **Consórcios Públicos de Resíduos**. Fortaleza, 2021. Disponível em: <<https://www.cidades.ce.gov.br/consorcios-publicos-de-residuos/>>. Acesso em: 21 out. 2020

SEMA. Secretaria do Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos do Ceará**. Fortaleza, 2015. Disponível em: <<https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2018/12/Versao-resumida-Finalizada-.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2020

_____. Secretaria do Meio Ambiente. **Plano de Coletas Seletivas Múltiplas**. Fortaleza, 2018. Disponível em: <<https://www.sema.ce.gov.br/plano-de-coletas-seletivas-multiplas/>>. Acesso em: 21 out. 2020

SLU-DF. Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal. **Relatório da análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do Distrito Federal – 2015**. Disponível em: <<http://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2019/06/relatorio-gravimetria-final-2015.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2020

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H. & VINIL, S. **Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues**. New York, USA: McGraw-Hill, 1993.

UNFCCC. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Methodological tool: Project emissions from flaring**. In: ACM0001: Flaring or use of landfill gas, v. 18.0. Bonn, 2017.

WALDVOGEL, B. C., FERREIRA, C. E. C. Estatísticas da Vida. **Revista: São Paulo em perspectiva**, volume 17, nº 3-4. São Paulo, 2003.

WEREKO-BROBBY, C. Y., HAGEN, E.B. **Biomass conversion and technology**. New York, USA: John Wiley & Sons, 2000.

APÊNDICE A – População dos municípios do Vale do Jaguaribe

Município	População total ao longo dos anos							
	1950	1960	1970	1980	1991	2000	2010	2020
Alto Santo	...	9.950	11.904	12.950	13.610	15.392	16.359	17.196
Ererê	...	...	...	...	6.437	6.300	6.840	7.225
Iracema	...	17.800	20.310	21.119	14.015	13.143	13.722	14.326
Jaguaretama	15.929	14.543	16.838	17.194	17.580	18.041	17.863	18.147
Jaguaribara	...	6.758	8.714	8.131	7.718	8.727	10.399	11.492
Jaguaribe	16.971	21.276	26.161	28.541	32.340	35.053	34.409	34.636
Limoeiro do Norte	37.269	18.481	25.623	32.754	41.700	49.580	56.264	59.890
Morada Nova	30.138	38.006	53.552	64.533	58.912	64.394	62.065	61.738
Palhano	-	3.910	5.106	7.105	7.946	8.158	8.866	9.422
Pereiro	25.617	18.201	20.609	21.568	14.792	15.156	15.757	16.331
Potiretama	...	...	...	...	5.784	5.751	6.126	6.437
Quixeré	...	8.582	11.221	12.485	13.801	16.856	19.412	22.293
Russas	34.077	25.863	34.239	38.513	46.566	57.290	69.833	78.882
S. J. do Jaguaribe	...	5.993	7.723	8.335	8.018	8.639	7.900	7.601
Tabuleiro do Norte	...	12.395	19.421	23.243	25.106	27.098	29.204	30.807
Total	160.001	201.758	261.421	296.471	314.325	349.578	375.019	396.423

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do IBGE (2021)

APÊNDICE B – Geração per capita de RSU do Vale do Jaguaribe

Município	Produção de RSU (kg/hab/dia)
Alto Santo	0,72
Ererê	0,72
Iracema	0,87
Jaguaretama	0,72
Jaguaribara	0,72
Jaguaribe	0,87
Limoeiro do Norte	0,87
Morada Nova	0,87
Palhano	0,72
Pereiro	0,72
Potiretama	0,72
Quixeré	0,87
Russas	1,01
S. J. do Jaguaribe	0,72
Tabuleiro do Norte	0,87

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do Governo do Estado (2021)