

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MURILO KALIL TORRES

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS: ESTUDO DE CASO DO ESGOTO
DOMÉSTICO DO OESTE PARANAENSE**

MEDIANEIRA

2022

MURILO KALIL TORRES

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS: ESTUDO DE CASO DO ESGOTO
DOMÉSTICO DO OESTE PARANAENSE**

***ENERGY POTENTIAL OF BIOGAS: CASE STUDY OF DOMESTIC SEWAGE IN
THE WEST OF PARANAENSE***

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Elias Lira dos Santos Junior.

MEDIANEIRA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MURILO KALIL TORRES

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS: ESTUDO DE CASO DO ESGOTO
DOMÉSTICO DO OESTE PARANAENSE**

**Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Ambiental da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).**

Data de aprovação: 23 de novembro de 2022

Elias Lira dos Santos Junior
Doutor em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR-MD

Fábio Orsatto
Doutor em Engenharia Agrícola
Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR-MD

Claudio Vinícius Arcego
Mestre em Engenharia Química
Biovalle Group

Fabio Luiz Fronza
Mestre em Tecnologias Ambientais
Frigorífico Astra

MEDIANEIRA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Elias Lira dos Santos Junior, pela paciência e tempo dedicado à minha orientação do trabalho, bem como pelo vasto conhecimento compartilhado e agregado ao meu intelecto.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira, por me proporcionar a possibilidade de cursar Bacharelado em Engenharia Ambiental, bem como por me disponibilizar um espaço repleto de possibilidades para meu aprimoramento pessoal, profissional e técnico.

Aos meus pais por estarem sempre ao meu lado nos momentos difíceis, aflorando em mim a persistência para enfrentar os desafios.

Aos amigos por terem papel fundamental no apoio intelectual e emocional durante a graduação.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para que a conclusão do meu curso fosse possível.

RESUMO

A falta de diversidade na matriz energética brasileira tem se mostrado preocupante, principalmente em momentos de crise hídrica, como a que ocorreu em 2021, diante desse fato, aliada a demanda da população por energia elétrica, faz-se necessário avaliar o cenário de geração de energia de um ponto de vista mais heterogêneo. O esgoto doméstico presente em estações de tratamento de esgoto, quando submetido à um processo de digestão anaeróbia, gera um complexo gasoso chamado biogás, esse gás apresenta em sua composição uma concentração de aproximadamente 70% de metano (CH_4), o qual tem um poder calorífico significativo, possibilitando sua utilização como combustível em motores de combustão interna, turbinas e microturbinas a gás. Por isso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto doméstico do Oeste paranaense. O objeto de estudo para essa pesquisa foram os 50 municípios pertencentes a mesorregião Oeste do Paraná. Os dados iniciais para os cálculos foram provenientes dos bancos de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. A metodologia adotada para a estimativa da produção de metano e do potencial de geração de energia elétrica foi descrita por Chernicharo *et al.* (1999), sendo utilizado a ferramenta Excel para a aplicação das equações descrita pelo modelo. Os resultados foram dispostos em três cenários distintos: o primeiro cenário trata dos municípios do Oeste do Paraná que apresentam tratamento anaeróbio do esgoto doméstico produzido pela população, o segundo cenário trata dos municípios que não apresentam qualquer sistema de tratamento de esgoto doméstico, gerando assim avaliações e considerações hipotéticas caso houvesse sistemas anaeróbios para o tratamento do efluente doméstico desses municípios, e por fim o terceiro cenário, o qual trata dos municípios que apresentam sistemas de tratamento de esgoto, porém esses não são anaeróbios, o que permite demonstrar um cenário hipotético caso essas estruturas de tratamento de esgoto já existentes fossem estritamente anaeróbias. Para o primeiro cenário foi possível perceber que Cascavel é o município com maior potencial de geração de energia elétrica, contando com 1,2713 MWh. Já no segundo cenário, Capitão Leônidas Marques foi o município que apresentou o maior potencial de produção energética, contando com 0,0530 MWh. Por fim, no terceiro cenário o município de Foz do Iguaçu apresentou o maior potencial de geração de energia elétrica, gerando aproximadamente 1,1616 MWh. Avaliando os resultados foi possível perceber que os valores do potencial de geração de energia elétrica estão intimamente relacionados com os índices populacionais. Ao final da pesquisa foi possível concluir que o cenário de produção de energia elétrica ainda é prematuro, uma vez que o potencial de geração de energia elétrica é significativamente inferior a demanda energética de cada município, porém a pesquisa serve como ferramenta para que sejam avaliadas possíveis melhoras nas técnicas e tecnologias de aproveitamento energético do biogás proveniente de estações de tratamento de esgoto anaeróbias.

Palavras-chave: Energia elétrica. Matéria orgânica. Metano. Tratamento biológico

ABSTRACT

The lack of diversity of the Brazilian energy matrix has been something to worry about the last years, especially in times of water crisis, such as what happened in 2021, given this fact, combined with a demand for energy for electricity, it is necessary to evaluate the scenario of power generation from a more heterogeneous point of view. The complex of sewage stations, when presented in a sewage treatment of its composition, with a gas treatment called in its composition, a sewage treatment process in its composition, with approximately 70% of methane gas, which has a calorific value, guaranteeing its use as fuel in engines for internal use, turbines and gas microturbines. Therefore, the present research aimed to evaluate the potential for generating electricity from biogas produced in domestic sewage treatment plants in western of the state of Paraná. The object of study for this research were the 50 municipalities belonging to the western mesoregion of Paraná. The initial data came from the National Sanitation Information System and National Agency databases. A methodology developed for a methane production budget and electricity generation potential was described by Chernicharo et al. (1999), being Excel used for the application of the tools of the mathematic model. The results were arranged in three different scenarios: the first scenario deals with the municipalities in the West of Paraná that present anaerobic treatment of domestic sewage produced by the population, the second scenario deals with the municipalities that do not have any domestic sewage treatment system, thus generating evaluations and hypothetical considerations if there were anaerobic systems for the treatment of domestic effluent in these municipalities, and finally the third scenario, which deals with municipalities that have sewage treatment systems, but these are not anaerobic, which allows demonstrating a hypothetical scenario if these existing sewage treatment structures were strictly anaerobic. For the first scenario, it was possible to perceive that the city of Cascavel is the municipality with the greatest potential for generating electricity, with 1.2713 MWh. In the second scenario, the place called Capitão Leônidas Marques was the municipality that presented the greatest potential for energy production, with 0.0530 MWh. Finally, in the third scenario, the municipality of Foz do Iguaçu presented the greatest potential for generating electricity, generating approximately 1.1616 MWh. Evaluating the results, it was possible to perceive that the values of the electric energy generation potential are closely related to the population indices. At the end of the research, it was possible to conclude that the scenario of electric energy production is still premature, since the potential for electric energy generation is significantly lower than the energy demand of each municipality, but the research serves as a tool to evaluate new possibilities and improvements in techniques and technologies for energy that uses biogas from anaerobic sewage treatment plants.

Keywords: Biological treatment. Electricity. Methane. Organic matter. Sewage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Variação da matriz elétrica nacional de 2020 a 2021.....	16
Figura 2 - Mapa dos municípios do Oeste do Paraná.....	23
Figura 3 - Mapa populacional dos municípios do Oeste do Paraná	32
Figura 4 - Mapa dos municípios do Oeste do Paraná que possuem tratamento de esgoto.....	34
Figura 5 - Mapa dos municípios do Oeste do Paraná que não possuem tratamento de esgoto	35
Figura 6 - Mapa dos municípios do Oeste do Paraná que possuem tratamento anaeróbio de esgoto	36
Figura 7 - Mapa do volume de esgoto doméstico gerado pelos municípios do Oeste do Paraná	37
Figura 8 - Mapa da produção volumétrica de metano dos municípios com tratamento anaeróbio	40
Figura 9 - Mapa da produção volumétrica de metano dos municípios sem tratamento de esgoto	42
Figura 10 - Mapa da produção volumétrica de metano dos municípios com tratamento não anaeróbio	44
Figura 11 - Mapa do potencial de geração de energia elétrica dos municípios com tratamento anaeróbio	46
Figura 12 - Mapa do potencial de geração de energia elétrica dos municípios sem tratamento de esgoto	48
Figura 13 - Mapa do potencial de geração de energia elétrica dos municípios com tratamento não anaeróbio	49
Figura 14 - Mapa da relação entre o potencial de geração de energia elétrica e índices populacionais	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura do esgoto e TDH utilizados	25
Tabela 2 - Índice de coleta de esgoto de cada município.....	39
Tabela 3 - Índice de coleta de esgoto dos municípios com outro tipo de tratamento.....	43
Tabela 4 - Relação entre geração e consumo de energia elétrica de cada município do Oeste do Paraná	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fontes geradoras de energia elétrica no Brasil	16
Quadro 2 - Tecnologias para geração de energia elétrica a partir do biogás.....	21
Quadro 3 - Relação DBO ₅ /DQO segundo autores.....	27
Quadro 4 - Perda de metano segundo autores.....	27
Quadro 5 - Mapas apresentados na pesquisa	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABTN	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ES	Espirito Santo
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GWh	Gigawatt-hora
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MG	Minas Gerais
MT	Mato Grosso
MW	Megawatt
NBR	Normas Brasileiras
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PB	Paraíba
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TDH	Tempo de Detenção Hidraulica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Matriz energética brasileira	15
3.2 Esgotamento sanitário	17
3.2.1 Diagnóstico do cenário nacional de esgotamento sanitário	19
3.3 Digestão anaeróbia e biogás	19
3.3.1 Tecnologias de aproveitamento do biogás	20
4 METODOLOGIA	22
4.1 Caracterização da pesquisa	22
4.2 Identificação dos municípios e caracterização das cidades objeto de estudo	22
4.3 Modelo matemático da estimativa de geração de energia elétrica	24
4.4 Síntese analítica dos resultados	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1. Resultado da caracterização dos municípios do oeste paranaense	32
5.1.1 Resultados da caracterização demográfica	32
5.1.2 Resultado da caracterização dos sistemas de esgotamento sanitário	34
5.1.3 Resultado da quantificação do volume de efluente gerado	36
5.2 Resultado da estimativa da geração de gás	38
5.2.1 Resultado para municípios com tratamento anaeróbio – cenário para curto prazo	39
5.2.2 Resultados para os municípios sem tratamento – cenário para médio prazo	41
5.2.3 Resultado para municípios com outros tipos de tratamento – cenário para longo prazo	43
5.3 Resultado do potencial de geração de energia elétrica	45
5.3.1 Resultado para municípios com tratamento anaeróbio – cenário para curto prazo	46
5.3.2 Resultado para municípios sem tratamento – cenário para médio prazo	47
5.3.3 Resultado para municípios com outros tipos de tratamento – cenário para longo prazo	49
5.4 Resultado da síntese analítica do estudo	50
6 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICE A - Temperatura média anual e TDH de cada município	60

1 INTRODUÇÃO

O intenso crescimento dos centros urbanos aliado ao estilo de vida da população, tem se mostrado preocupante quando avaliado o espectro de geração de resíduos, principalmente aqueles provenientes do esgotamento sanitário doméstico.

Em paralelo a esse cenário, a população brasileira tem gerado uma grande demanda de energia elétrica para a realização das atividades humanas, sejam elas econômicas ou meramente domésticas.

Unindo esses dois cenários, de um lado a incessante geração de resíduos em esgotos domésticos, e de outro, a demanda por energia elétrica, tem-se buscado aprimorar o desenvolvimento de técnicas e tecnologias para viabilizar a geração de energia elétrica a partir da biomassa presentes em estações de tratamento de esgoto.

A digestão anaeróbia do esgoto doméstico, gera um produto final chamado biogás, esse gás tem o potencial significativo de geração de energia, uma vez que seu alto poder calorífico permite a sua queima, a qual impulsiona o funcionamento mecânico de motores geradores de eletricidade.

A utilização da biomassa como matéria prima para a geração de energia é uma iniciativa que está alinhada com preceitos ligados a sustentabilidade, isso porque o biogás produzido é composto majoritariamente por metano (CH_4), que é um dos maiores intensificadores do efeito estufa.

O biogás é um composto gasoso que apresenta substância odorantes e por isso é necessária uma atenção com os próprios reatores que armazenam esse gás, uma vez que possíveis falhas no acondicionamento gerariam danos ao meio ambiente e a população local (CHERNICHARO, 2007).

O potencial gerador de biogás em ETEs é bastante significativo, isso porque de acordo com o Diagnóstico do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) dos Serviços de Água e Esgotos 2019 (SNIS, 2019), foram identificados 354,3 mil quilômetros de redes públicas de esgotamento sanitário, onde o volume coletado foi de pelo menos 5,8 bilhões de m^3 , sendo 4,5 bilhões de m^3 de esgoto tratados.

Para o pleno funcionamento das ETEs públicas, são gastos em torno de 0,25 kWh/m^3 , resultando em um consumo total de 1,4 TWh, o que é um valor considerado de consumo energético, impulsionando ainda mais a geração de energia utilizando a

biomassa local, podendo tornar uma ETE autossuficiente energeticamente (SNIS, 2019).

Segundo dados disponibilizados pelo Balanço Energético Nacional 2021 (Empresa de Pesquisa Energética, 2021), no Brasil, de toda a energia produzida, cerca de 80% é proveniente de hidrelétricas, o que torna a matriz energética nacional muito frágil.

Em 2021 foi registrada a pior crise hídrica dos últimos 91 anos, causada principalmente pela escassez de chuvas em todo o território brasileiro, o que gerou uma intensa e constante instabilidade nos sistemas de distribuição de energia elétrica para os centros urbanos (AGÊNCIA NACIONAL, 2021), o que reforça ainda mais o fato da intensa busca por diversidade na matriz energética.

Ainda segundo o Balanço Energético Nacional 2021 (EPE, 2021), a produção de energia elétrica a partir do Biogás teve um aumento de 15,7% quando comparado o período de 2019 a 2020.

Tal aumento percentual foi bastante expressivo e otimista, porém ainda requer muitos avanços, uma vez que a energia proveniente de biogás representa apenas 0,1% de toda a energia produzida no Brasil (EPE, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de geração de energia elétrica, no Oeste do Paraná, por processo de digestão anaeróbia da matéria carbonácea do esgoto doméstico.

2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Avaliar o potencial de geração de energia elétrica dos Municípios do Oeste do Paraná com Tratamento biológico;
- Avaliar o potencial de geração de energia elétrica dos Municípios do Oeste do Paraná sem tratamento algum;
- Avaliar o potencial de geração de energia elétrica dos Municípios do Oeste do Paraná com tratamento sem sistemas anaeróbio

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Matriz energética brasileira

A grande riqueza hídrica no território nacional viabilizou a implementação em grande escala de hidrelétricas para aproveitamento energético, fato esse que levou a uma crescente predominância da matriz hidráulica no cenário de produção de energia elétrica no Brasil.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz energética brasileira é muito pouco diversificada, o que permite um cenário de preocupações, uma vez que a escassez hídrica no território nacional garantiria um colapso energético.

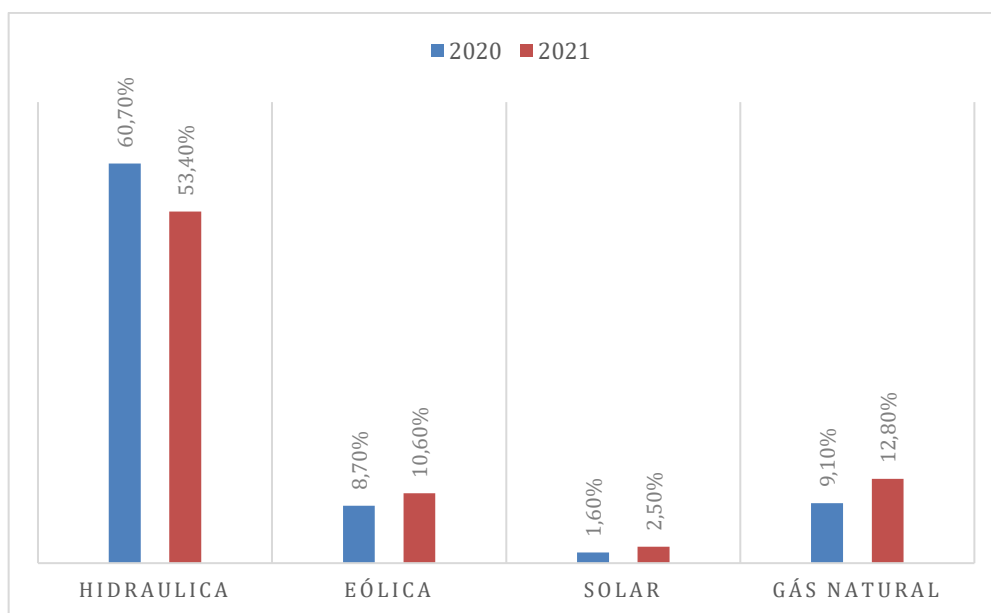
Dados disponibilizados pela EPE demonstram que em 2021 a produção hidráulica de energia representava 56,8% de toda a matriz energética, confirmando a afirmativa anterior.

Porém esse cenário apresentou uma tendência de melhora, uma vez que a diversidade na matriz energética nacional tem demonstrado avanços.

Quando comparados os dados disponibilizados pela EPE, comparando os anos de 2020 e 2021, as hidrelétricas apresentaram uma redução percentual de 7,3%, onde, simultaneamente, houve uma crescente evolução nas matrizes carvão e derivados (0,7%), eólica (1,9%), solar (0,9%), gás natural (3,7%) e derivados de petróleo (1,3%), como demonstrado na Figura 1.

Essa mudança no panorama energético nacional está diretamente relacionada a escassez hídrica ocorrida em 2021, o que induziu a uma compensação energética com as demais fontes geradoras.

Figura 1: Variação da matriz elétrica nacional de 2020 a 2021.



Fonte: Balanço energético nacional (2022).

Atualmente, o Brasil conta com uma vasta diversidade de fontes geradoras de energia elétrica, sejam elas renováveis ou não. No quadro 1 é apresentado o panorama de geração de energia elétrica no território nacional.

Quadro 1 - Fontes geradoras de energia elétrica no Brasil

Fonte Geradora	Geração (%)
Hidráulica	56,8
Gás natural	12,8
Biomassa	8,2
Eólica	10,6
Solar	2,5
Outras	9,1

Fonte: Balanço energético nacional (2022).

O Brasil conta com inúmeras infraestruturas para geração de energia elétrica, somando um potencial de geração de cerca de 91.170 MW, onde há predominância de fontes hidrelétricas em pontos estratégicos no território nacional (ANEEL, 2005).

Segundo dados mais recentes disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a produção energética em 2021 foi de 656.109 GWh, garantindo um aumento de 4,3% em relação ao ano anterior (EPE, 2021).

3.2 Esgotamento sanitário

A Lei nº 14.026/2020 caracteriza o Esgotamento Sanitário como sendo um dos conjuntos de serviços públicos formadores do Saneamento Básico. O sistema de Esgotamento Sanitário compreende a união de técnicas, infraestruturas e instalações operacionais responsáveis pela coleta, transporte, tratamento e disposição final do esgoto gerado nas cidades (SNIS, 2020).

Ainda segundo a Norma Brasileira NBR 9648, a qual trata sobre o “Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário”, traz como definição para o esgoto sanitário como sendo o despejo líquido constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária (ABNT, 1986).

Essa mesma NBR, normatiza despejos de ordem doméstica, pluvial e industrial, compreendendo, de forma unificada, o formato do esgotamento sanitário que conhecemos no Brasil.

A finalidade de todos esses processos é garantir à população a oportunidade de reutilizar a água tratada pelas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), ou mesmo garantir o lançamento de forma adequada ao meio ambiente (SNIS, 2020).

As características físicas de um esgoto sanitário são dispostas pelo comportamento de aspectos como matéria sólida, temperatura, odor, cor, turbidez e variação de vazão. A composição desse tipo de efluente garante um percentual de aproximadamente 99,9% de água, onde apenas 0,1% é matéria sólida, porém essa pequena parcela de 0,1% é o motivo de o esgoto sanitário necessitar de um tratamento, haja vista que a matéria sólida apresenta alto potencial poluidor. O esgoto presente em ETE não costuma apresentar temperaturas significativamente maiores do que a temperatura da água para abastecimento dos municípios (FUNASA, 2019).

O odor é uma característica predominante no esgoto sanitário, uma vez que esse efluente apresenta grandes porções volumétricas gasosas sendo produzidas, consequência da intensa atividade microbiana de decomposição da matéria orgânica presente no meio (FUNASA, 2019).

Já as características químicas estão diretamente relacionadas com a presença de areia e substâncias minerais dissolvidas (matéria inorgânica), além de relações químicas entre carbono; hidrogênio; oxigênio e nitrogênio (matéria orgânica). As características biológicas compreendem a avaliação de critérios como microrganismos em águas residuais e indicadores de poluição (MULLER, 2021).

Aproximadamente 70% dos sólidos presentes no esgoto sanitário são de origem orgânica, representando os sólidos voláteis. Esses, em sua maioria, são carbonatados ou nitrogenados, apresentando cadeias de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (FUNASA, 2019).

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é um parâmetro muito importante para caracterizar o esgoto sanitário que se deseja, uma vez que esse parâmetro permite quantificar, indiretamente, a composição de matéria orgânica presente no efluente. A DBO quantifica quanto de oxigênio é necessário para que haja uma estabilização bioquímica do meio, quantificando a demanda de oxigênio que as atividades metabólicas dos microrganismos decompositores necessitam. Geralmente esse parâmetro é representado pela unidade mg/L, e em esgotos sanitários brutos a DBO pode variar de 200 a 400 mg/L (FUNASA, 2019).

A demanda química de oxigênio (DQO) é outro parâmetro que indica, indiretamente, a concentração de matéria orgânica em um esgoto doméstico. Esse parâmetro apresenta quanto de oxigênio é necessário para que reações de oxidação química ocorram até a estabilização química do meio (FUNASA, 2019).

Outro parâmetro muito utilizado para caracterizar um esgoto sanitário é a presença de nitrogênio (N). Esse composto após um período submetido às ações microbianas, quando oxidado, reduz-se o nitrogênio em nitrito e nitrato, o que permite avaliar a idade da poluição, se recente ou mais antiga (FUNASA, 2019). Vale ressaltar que a presença de Nitrogênio amoniacal em efluentes torna-o altamente recalcitrante, o que muitas vezes dificulta ou até mesmo impossibilita a ação de decomposição por parte dos microrganismos presentes no esgoto.

A caracterização da vazão de esgoto doméstico é um parâmetro muito importante a ser considerado, isso porque o dimensionamento hidráulico de ETEs e a proposta de soluções de problemas pertinentes a essa temática, estão diretamente ligadas ao volume de esgoto gerado em um determinado tempo. A vazão de efluente doméstico está intimamente relacionada com o estilo de vida da população, bem como o número de habitantes que um município tem.

3.2.1 Diagnóstico do cenário nacional de esgotamento sanitário

Dados publicados pelo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento 2020 (SNIS), apresentam no Brasil um cenário muito heterogêneo quando tratado do assunto esgotamento sanitário.

Segundo as pesquisas realizadas pela instituição, no Brasil em 2020, cerca de 4.744 municípios (85,17%) contavam com serviços de esgotamento sanitário por rede coletora funcionando pelo menos uma vez nesse ano.

No parâmetro regional do país para a rede coletora de esgoto, os índices de população atendida, compreendiam na Região Sudeste 80,5%, na Região Nordeste 30,3%; na Região Sul 47,4%; na Região Centro-Oeste 59,5%; e, na Região Norte 13,1% (SNIS, 2020).

Analisando o panorama nacional, das 27 Unidades da Federação, apenas 11 delas contam com mais de 50% dos Municípios com acesso a rede de esgoto, sendo o Estado de São Paulo com 100% e o Maranhão com 6,5% (IBGE, 2017).

3.3 Digestão anaeróbia e biogás

A digestão anaeróbia é um processo fermentativo que consiste na degradação da matéria orgânica complexa, transformando-a em compostos mais simples.

Como material resultante desse processo temos uma mistura gasosa, chamada biogás. Durante o processo de fermentação da matéria orgânico pode ainda ocorrer a produção de biofertilizantes, que podem ser utilizados na agricultura como fonte de nutrientes, seguindo preceitos da Resolução CONAMA 375/2006 (SILVA, 2015).

Em estações de tratamento de esgoto doméstico, o biogás produzido apresenta concentrações de metano (CH₄), nitrogênio (N₂) e dióxido de carbono (CO₂), onde o metano representa majoritariamente de 70 a 80% do composto gasoso (NOYOLA *et al.*, 2006).

O poder calorífico do CH₄ é de 35,9 MJ.Nm⁻³, ou seja, em um biogás com composição de 60% de CH₄, seu poder calorífico é de 21,5 MJ.Nm⁻³, o que corresponde a cerca de 70% do poder calorífico do gás natural (ROSA, 2016).

Por esses fatos, o biogás tem se tornado uma ótima alternativa para a geração de energia, uma vez que a sua queima (combustão) gera energia mecânica direta ou indiretamente.

A combustão direta pode ocorrer por meio de caldeiras, onde o biogás é utilizado como combustível responsável por transferir energia para um fluido de trabalho (água), onde o mesmo é evaporado, gerando trabalho mecânico (LOBATO, 2011).

3.3.1 Tecnologias de aproveitamento do biogás

Com o aumento da necessidade de geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas, o desenvolvimento tecnológico para ferramentas e equipamentos geradores de energia elétrica a partir do biogás tem acompanhado proporcionalmente essa crescente demanda. O princípio dessas tecnologias consiste na conversão de energia química para energia mecânica, a partir da combustão controlada desse gás.

A geração de energia elétrica a partir dessa queima pode se dar de duas formas principais, a utilização da energia mecânica gerada no processo para movimentar um alternador, o qual converte energia mecânica em energia elétrica, ou mesmo a combustão direta, que pode ocorrer por meio de caldeiras, onde o biogás é utilizado como combustível responsável por transferir energia térmica para um fluido de trabalho (água), onde o mesmo é evaporado, movendo turbinas a vapor, gerando, conseqüentemente, trabalho mecânico e energia elétrica (SILVA, 2015).

Vale ressaltar que boa parte das tecnologias de geração de energia elétrica a partir do biogás, disponíveis no mercado, foram criadas com o intuito de utilizar fezes animais como matéria prima principal, o que exige uma atenção maior quanto as

concentrações de metano presentes na composição do biogás (SILVA, 2015). No Quadro 2 estão apresentadas as principais tecnologias de geração de energia elétrica a partir do biogás, disponíveis no mercado.

Quadro 2 - Tecnologias para geração de energia elétrica a partir do biogás

Tipo de tecnologia	Princípio de funcionamento
Motores de combustão interna	Transforma a energia térmica em energia mecânica por meio de pistões confinados em cilindros.
Turbinas a gás	Transforma a energia da combustão do gás (sob alta pressão) em energia mecânica nas turbinas a gás
Microturbinas a gás	Transforma a energia da combustão do gás (sob alta pressão) em energia mecânica nas turbinas a gás, porém em dimensões reduzidas

Fonte: Adaptação de SILVA (2015).

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização da pesquisa

Toda a pesquisa teve caráter exploratório, ou seja, a proposta das análises realizadas faz uma reflexão sobre esse tipo de aproveitamento energético ou o que pode ser realizados acerca da utilização de biogás provenientes de esgotos domésticos para fins de geração de energia elétrica.

O trabalho foi realizado em quatro etapas distintas e complementares entre si: a identificação dos municípios alvo, a caracterização demográfica dos mesmos, seguida da caracterização do sistema de tratamento de esgoto de cada um dos municípios, e por último a estimativa da produção de gás e energia das respectivas ETE's. O ano base de análise foram os dados provenientes de 2020, com exceção dos dados referentes a Carga Orgânica, a qual tem como ano base 2013, levantado pela Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

4.2 Identificação dos municípios e caracterização das cidades objeto de estudo

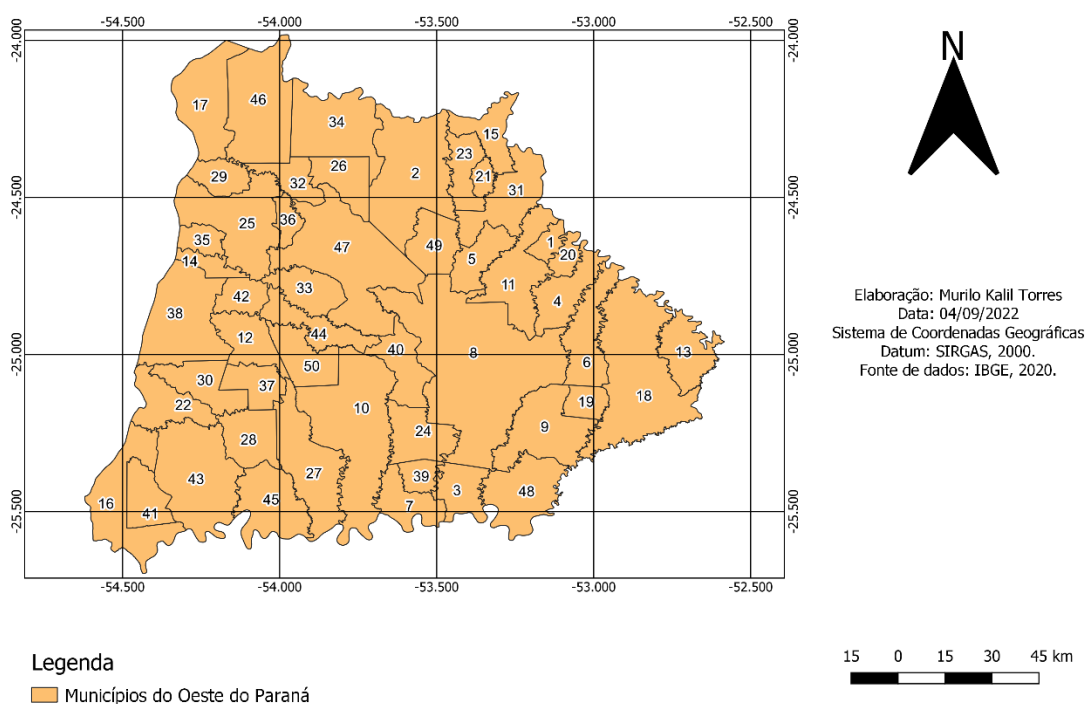
Como primeiro passo para a identificação dos municípios, foram selecionados aqueles localizados na região oeste do estado do Paraná (50 municípios), o que possibilitou uma análise demográfica mais precisa de quais municípios dessa região poderiam apresentar maior potencial de geração de energia a partir do biogás produzido nas ETE's, tendo como base o volume gerado.

Os municípios alvo dessa pesquisa são: Anahy (1), Assis Chateaubriand (2), Boa Vista da Aparecida (3), Braganey (4), Cafelândia (5), Campo Bonito (6), Capitão Leônidas Marques (7), Cascavel (8), Catanduvas (9), Céu Azul (10), Corbélia (11), Diamante D Oeste (12), Diamante do Sul (13), Entre Rios do Oeste (14), Formosa do Oeste (15), Foz do Iguaçu (16), Guaíra (17), Guaraniaçu (18), Ibema (19), Iguatu (20), Iracema do Oeste (21), Itaipulândia (22), Jesuítas (23), Lindoeste (24), Marechal Cândido Rondon (25), Maripá (26), Matelândia (27), Medianeira (28), Mercedes (29), Missal (30), Nova Aurora (31), Nova Santa Rosa (32), Ouro Verde do Oeste (33), Palotina (34), Pato Bragado (35), Quatro Pontes (36), Ramilândia (37), Santa Helena (38), Santa Lúcia (39), Santa Tereza do Oeste (40), Santa Terezinha de Itaipu (41),

São José das Palmeiras (42), São Miguel do Iguaçu (43), São Pedro do Iguaçu (44), Serranópolis do Iguaçu (45), Terra Roxa (46), Toledo (47), Três Barras do Paraná (48), Tupãssi (49) e Vera Cruz do Oeste (50).

A representação utilizada neste trabalho está descrita na Figura 1, onde estão constantes todos os municípios já citados.

Figura 2 - Mapa dos municípios do Oeste do Paraná



Fonte: Autoria própria (2022).

Os dados de densidade demográfica foram obtidos a partir de pesquisas realizadas nas plataformas digitais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), onde as informações referentes ao ano de 2020 foram coletadas e plotadas em planilhas para melhor organização e visualização.

Já para a caracterização dos sistemas de tratamento de esgoto dos municípios alvo, foram utilizados dados quantitativos disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), também referentes ao ano de 2020. Mais precisamente foram coletadas informações sobre o consumo de água (m^3/dia) e índice de coleta de esgoto.

A definição de quais municípios apresentam sistemas anaeróbios no tratamento do esgotamento doméstico foi realizada a partir dos levantamentos realizados por Müller (2021), onde a autora caracteriza qualitativa e quantitativamente os sistemas de tratamento de esgoto dos municípios do oeste do Paraná.

Dados de cada município referentes ao efluente produzido (m^3/dia), efluente tratado (m^3/dia) e efluente não tratado (m^3/dia) foram gerados a partir de informações constantes na literatura, onde respectivamente são representados por 80% da água consumida no município, efluente tratado multiplicado pelo índice de coleta e por último a diferença do efluente produzido pelo efluente tratado.

As informações referentes às cargas orgânicas produzidas por cada município em seu esgoto doméstico, foram obtidas a partir de pesquisas realizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2013). Os tipos de tratamento empregados em cada município foram obtidos em Muller (2021).

4.3 Modelo matemático da estimativa de geração de energia elétrica

A metodologia adotada no presente trabalho visa estimar a produção de metano proveniente da matéria carbonácea presente no esgoto doméstico das ETEs compostas por sistemas de tratamentos estritamente anaeróbios.

O modelo matemático utilizado foi descrito por Chernicharo *et al.* (1999), sendo utilizado a ferramenta Excel para a aplicação das equações descrita pelo modelo.

O modelo matemático apresenta as estimativas de produção de metano e também a produção de energia elétrica a partir da combustão desse gás. Após a caracterização dos municípios estudados foram seguidas as seguintes etapas:

1ª etapa: Obtenção da vazão doméstica per capita e concentração de DBO de entrada.

A vazão *per capita* de esgoto produzido e a concentração de entrada é dada respectivamente por:

$$Q = \frac{Q_e}{Pop} \quad (1)$$

$$C_e = \frac{CO}{Pop} \quad (2)$$

Q = Vazão doméstica per capita em (m³/hab.dia);

Q_e = Efluente produzido pelo município (m³/dia);

Pop = População do município (habitantes);

C_e = Concentração de entrada (mg/L);

CO = Carga Orgânica (g DBO/dia);

Q_e = Efluente produzido pelo município (m³/dia).

2ª etapa: Eficiência do Sistema

De acordo com Chernicharo et al. (1999), a eficiência do sistema anaeróbio pode ser obtida pela equação 3:

$$E_{DQO} = 100 \cdot (1 - 0,68 \cdot TDH^{-0,35}) \quad (3)$$

E_{DQO} = Eficiência do Reator UASB em termos de remoção de DBO (%);

TDH = Tempo de Detenção Hidráulica (h).

O tempo de detenção hidráulica (TDH) foi obtido seguindo os estudos realizados por Rissoli (2004), onde o mesmo aponta como deve se comportar os parâmetros operacionais dos reatores UASB para tratamento de esgoto doméstico. Para o autor, os valores de TDH devem estar de acordo com a temperatura em que o efluente chega à estação de tratamento de esgoto. Na Tabela 1 estão os intervalos médios de TDH em horas para cada intervalo de temperatura avaliado.

Tabela 1 - Temperatura do esgoto e TDH utilizados

REATORES UASB	
Temperatura do esgoto (°C)	Tempo de Detenção Hidráulica (h)
16 – 19	10 – 14
20 – 26	6 – 9
> 26	6

Fonte: Rissoli (2004)

Logo, percebe-se que os valores de TDH variam de acordo com a temperatura ambiente, dessa forma, para as análises de cada município avaliado, foram consideradas as médias anuais de temperatura em graus *Celsius* disponíveis nos bancos de dados do CLIMATE-DATA.

As temperaturas médias anuais de cada município, acompanhado dos seus Ids e seus respectivos TDH estão dispostos no apêndice A.

Os números de identificação dos municípios para esse trabalho servirão como orientação para citá-los nos resultados com o desenvolvimento da pesquisa, com a finalidade de evitar repetições na chamada pelos municípios.

3ª etapa: Produção volumétrica de metano.

Para a carga de DQO convertida em metano, fator de correção para a temperatura operacional e a produção volumétrica de CH₄ per capita, temos as seguintes equações:

$$DQO_{CH_4} = Q * (S_0 - S) - 0,2 * Q * S_0 \quad (4)$$

$$K_{(T)} = \frac{P * K}{R * (273 + T)} \quad (5)$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K_{(T)}} \quad (6)$$

S₀ = DQO afluyente (mg/L);

S = DQO efluente (mg/L);

Q = Vazão doméstica per capita em (m³/hab.dia);

P = pressão atmosférica (1 atm);

K = DQO correspondente a 1 mol de CH₄ (64gDQO_{CH4}/mol);

R = 0,08206 atm.L/mol.K);

T = temperatura média dos municípios (°C).

A DQO afluyente pode ser estimada a partir da relação DBO₅/DQO. Diversos são os estudos realizados que demonstram valores para essa relação. Na tabela abaixo estão representados os resultados obtidos por diversos autores. Sendo que para esse estudo, o valor adotado para a relação DBO₅/DQO foi a média das médias das referências do Quadro 3.

Quadro 3 - Relação DBO₅/DQO segundo autores

Autor	Ano	Local	DBO₅/DQO
Silva	1979	EXTRABES – PB	0,33 a 0,47
Oliveira	1982	Rabat (Marrocos)	0,33 a 0,40
Shimada <i>et al.</i>	1987	Cuiabá – MT	0,49
Carvalho <i>et al.</i>	1993	Belo Horizonte – MG	0,47
Silva <i>et al.</i>	2003	Vitória - ES	0,47

Fonte: Silva et al. (2003)

4ª etapa: Cálculo da disponibilidade de geração de energia elétrica (DIE)

Resultados teóricos tendem a apresentar diferenças significativas de valores expressos por resultados práticos. Por esse fato, diversos são os estudos realizados por pesquisadores que estimam a perda de metano em relação a produção teórica. Na tabela abaixo estão listados valores estimados por alguns autores.

Quadro 4 - Perda de metano segundo autores

Autores	Perda de metano real
Van Haandel e Lettinga (1994)	20 – 50%
Agrawal <i>et al.</i>	50%
Singh e Viraraghavan (1997)	60%
Veronez e Gonçalves (2002)	39%
Keller e Hartley (2003)	14%
Seghezzo (2004)	18%
Souza (2010)	35 – 41%

Fonte: Perovano; Formigoni (2011)

Para a obtenção mais fidedigna da geração elétrica foi considerada uma perda nos sistemas de 36,4%, onde esse valor foi considerado a partir da média dos valores encontrados pelos pesquisadores citados no Quadro 4, sendo a disponibilidade energética expressa por:

$$DIE = Q'_{biogás} * 8200 \quad (7)$$

DIE = Disponibilidade Energética *per capita* (kcal/hab.dia);

$Q'_{biogás}$ = Produção Volumétrica *per capita* de biogás (m³/hab.dia)

4.4 Síntese analítica dos resultados

A sistematização de dados é um mecanismo de ordenamento de dados, os quais obedecem a parâmetros ou regras similares, promovendo a obtenção de dados representativos e objetivos para o que se estuda. Diversas são as ferramentas que realizam esse tipo de ordenamento, a qual pode-se citar a representação de resultados por mapas temáticos.

Os mapas temáticos são ferramentas gráficas vastamente utilizadas para a exposição de dados de forma clara e objetiva, os quais permitem ao leitor uma noção do comportamento geográfico de uma determinada área avaliada.

Dessa forma, os dados e resultados dos estudos feitos, foram dispostos em mapas qualitativos e quantitativos a depender da abordagem realizada, o que permitiu uma maior visualização das situações apresentadas, bem como facilitação das correlações dos dados expostos pelo trabalho.

Diversas são as ferramentas utilizadas para a confecção de mapas temáticos, algumas com maior poder de complexidade e outras nem tanto. Assim, avaliando a aplicabilidade dos mapas gerados, decidiu-se utilizar a ferramenta QGIS (versão 3.22), a qual se enquadra como um Sistema de Informação Geográfica (SIG), sendo um projeto da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), disponível para as plataformas Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Andoid. Para essa pesquisa, foi utilizado o sistema operacional Windows.

De modo geral, o *software* QGIS apresenta funcionalidades intuitivas, porém é necessário ter em mente que as bases de dados de informações geográficas devem ser providenciadas por bancos de dados externos, como por exemplo o IBGE.

O mapa base (*shapefile*) do trabalho foi adquirido através da malha municipal disponível no site do IBGE (2021). Após o download do mapa contendo todos os municípios do Oeste do Paraná, foram realizadas filtragens da camada principal, onde apenas os municípios que compreendem a mesorregião estudada foram selecionados e exportados para uma nova camada, a qual seria a nova base para as análises do

trabalho.

Para a manipulação dos dados em mapas, deve-se inserir essas informações em cada município na chamada tabela de atributos, a qual dispõe em uma planilha, todas as informações que são pertinentes a cada município avaliado.

Todos os mapas foram realizados de forma padrão, ou seja, todos foram construídos utilizando a mesma escala (1:800.000) e critérios para a confecção das classes de divisão dos dados quantitativos.

As classes são intervalos de variação que cada coloração irá apresentar no mapa e em sua legenda. Assim, para que as análises dos mapas fossem realizadas de forma homogênea, foram utilizados os mesmos números de classes para mapas quantitativos (7 classes, exceto para o mapa de produção volumétrica de CH₄ dos municípios com tratamento anaeróbio, o qual apresentou análise eficiente com 5 classes), e mapas qualitativos (2 classes).

O “modo” utilizado para realizar a classificação das classes dos mapas quantitativos foi a “Quebra Natural (Jenks)”, pois essa apresentava um maior potencial de representatividade dos dados nos mapas, além de apresentar valores inteiros.

Para fins de avaliação de mapas, há uma preferência de que as classes apresentadas na legenda do mapa tenham intervalos iguais entre si, onde o “modo” para esse tipo de representação seria o “Intervalo Igual”, porém como já relatado anteriormente, a “Quebra Natural (Jenks)” permitiu uma maior representatividade dos dados, sendo, dessa forma, sacrificado o critério de classes com intervalos iguais.

Vale ressaltar que mesmo utilizando a “Quebra Natural (Jenks)”, a diferença na variação entre as classes dos mapas quantitativos não foi suficiente a ponto de comprometer qualquer tipo de análise dos dados contidos nos mapas temáticos.

Foram construídos 12 (doze) mapas temáticos, sendo 7 (sete) quantitativos e 5 (cinco) qualitativos. Os títulos dos mapas estão descritos no Quadro 5.

Quadro 5 – Mapas apresentados na pesquisa

Mapa	Tipo	Descrição sumaria
Mapa Populacional do Oeste do Estado do Paraná (2020)	Qualitativo	O mapa apresenta informações referentes ao número de habitantes de cada município
Mapa dos Municípios Sem Tratamento de Esgoto (2020)	Qualitativo	O mapa apresenta em destaque os municípios sem qualquer tratamento de esgoto
Mapa dos Municípios com Tratamento Anaeróbio (2020)	Qualitativo	O mapa apresenta em destaque os municípios com tratamento de esgoto anaeróbio
Mapa dos Municípios com Sistema de Tratamento de Esgoto (2020)	Qualitativo	O mapa apresenta em destaque os municípios com tratamento de esgoto diferente do anaeróbio
Mapa do Oeste do Estado do Paraná (2020)	Qualitativo	O mapa apresenta todos os municípios do Oeste do Paraná com suas respectivas identificações
Mapa de Produção Volumétrica de CH ₄ dos municípios com Tratamento Anaeróbio	Quantitativo	O mapa apresenta os valores volumétricos de metano produzido pelos municípios com tratamento de esgoto anaeróbio
Mapa da Produção Volumétrica de CH ₄ dos Municípios com Tratamento não Anaeróbio (2020)	Quantitativo	O mapa apresenta os valores volumétricos de metano produzido pelos municípios com tratamento de esgoto não anaeróbio
Mapa da Produção Volumétrica de CH ₄ dos municípios sem Tratamento de Esgoto (2020)	Quantitativo	O mapa apresenta os valores volumétricos de metano produzido pelos municípios sem tratamento de esgoto

Mapa	Tipo	Descrição sumaria
Mapa do Volume de Esgoto Doméstico Gerado (2020)	Quantitativo	O mapa apresenta os valores volumétricos da produção de esgoto em m ³ /dia de cada município
Mapa do Potencial de produção de energia elétrica dos municípios com tratamento anaeróbio	Quantitativo	O mapa apresenta o potencial de geração de energia elétrica para cada município com tratamento anaeróbio
Mapa do Potencial de produção de Energia Elétrica dos Municípios com Tratamento não anaeróbio (2020)	Quantitativo	O mapa apresenta o potencial de geração de energia elétrica para cada município com tratamento não anaeróbio
Mapa do Potencial de produção de Energia Elétrica dos Municípios sem tratamento de Esgoto (2020)	Quantitativo	O mapa apresenta o potencial de geração de energia elétrica para cada município sem tratamento de esgoto

Fonte: Autoria Própria (2022)

Além da construção dos mapas, os resultados foram dispostos em 3 (três) cenários distintos. O primeiro cenário corresponde a avaliação da potencialidade de geração de energia elétrica a partir do biogás dos municípios que com tratamento biológico (anaeróbio) do efluente doméstico gerado (cenário para curto prazo).

O segundo cenário é compreendido pelos municípios sem qualquer sistema de tratamento do esgoto gerado pela população (cenário para médio prazo), e por último, mas não menos importante, o cenário dos municípios que apresentam sistemas de tratamento de esgoto estritamente não anaeróbio (cenário para longo prazo).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultado da caracterização dos municípios do oeste paranaense

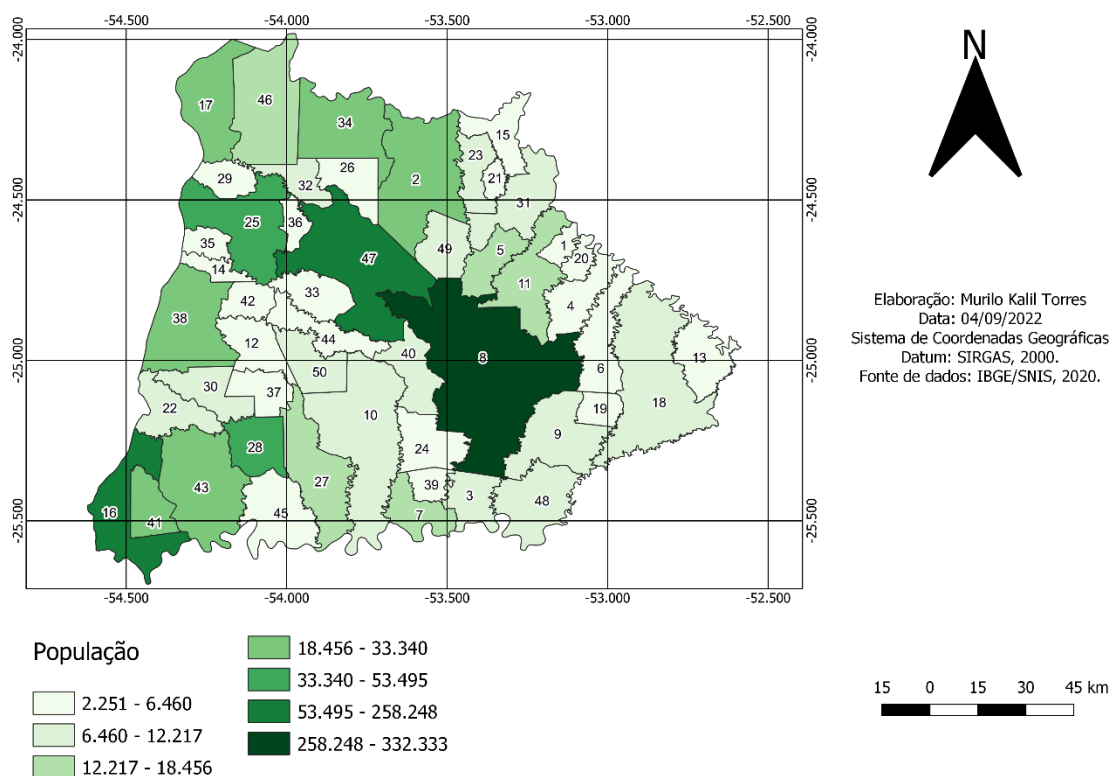
Nos próximos tópicos, serão apresentados e discutidos os resultados pertinentes a manipulação dos dados referentes a identificação e caracterização de todos os municípios avaliados nessa pesquisa.

5.1.1 Resultados da caracterização demográfica

O primeiro aspecto relacionado aos municípios alvos da pesquisa foi o levantamento demográfico, pois é a partir dessa informação que se tem a real noção de quais localidades requerem maior ou menor atenção.

Os dados de levantamento demográfico dos municípios, disponibilizados pelo IBGE (2020), estão dispostos na Figura 3, a qual representa, na forma de mapa, a densidade populacional de cada município avaliado no estudo.

Figura 3 - Mapa populacional dos municípios do Oeste do Paraná



Fonte: Autoria própria (2022).

A delimitação dos estratos da população foi segundo a Lei de Sturges, para agrupamento em intervalos de classes.

A Região Oeste do Paraná conta com uma população total de 1.322.794 habitantes, a qual representa 11,49% da população de todo o Estado. A área da mesorregião Oeste conta com uma área territorial de 22.859,762 km², correspondendo a 11,44% de toda a área do Paraná.

No mapa, é possível perceber que há uma predominância de maiores números populacionais nos municípios de Cascavel (8), Foz do Iguaçu (16) e Toledo (47), os quais, juntos, representam 55,43% de todo o Oeste do Paraná, demonstrando expressivo percentual da população quando analisada essa mesorregião.

De todos os municípios avaliados no estudo, 92% apresentam população inferior a 50.000 habitantes. Cerca de 78% dos municípios do Oeste paranaense apresentam população inferior a 20.000 habitantes e 50% têm população entre 2.251 e 8392 habitantes. Iracema do Oeste, Iguatu e Anahy são os três municípios do Oeste paranaense com menor população, contanto com 2251, 2253 e 2788 habitantes, respectivamente, representando um percentual de 0,55% de toda a população da mesorregião.

Além disso, os municípios que contam com uma população superior a 8.392 habitantes representam 25%, também representando a mesma parcela percentual de municípios, estão os que apresentam população de até 2.251 habitantes.

A mesorregião Oeste do Paraná apresenta uma média populacional de 26.456 habitantes por município, representando um valor populacional expressivo para a região. O coeficiente de variabilidade ou grau de dispersão relativa encontrada foi de 227%.

Considerando o volume populacional da região estudada e o mapa apresentado, pode-se perceber que existe um corredor de municípios com baixa população que fazem fronteira entre si, o que gera margem para o desenvolvimento de estudos conjuntos que relacionem a temática abordada neste trabalho.

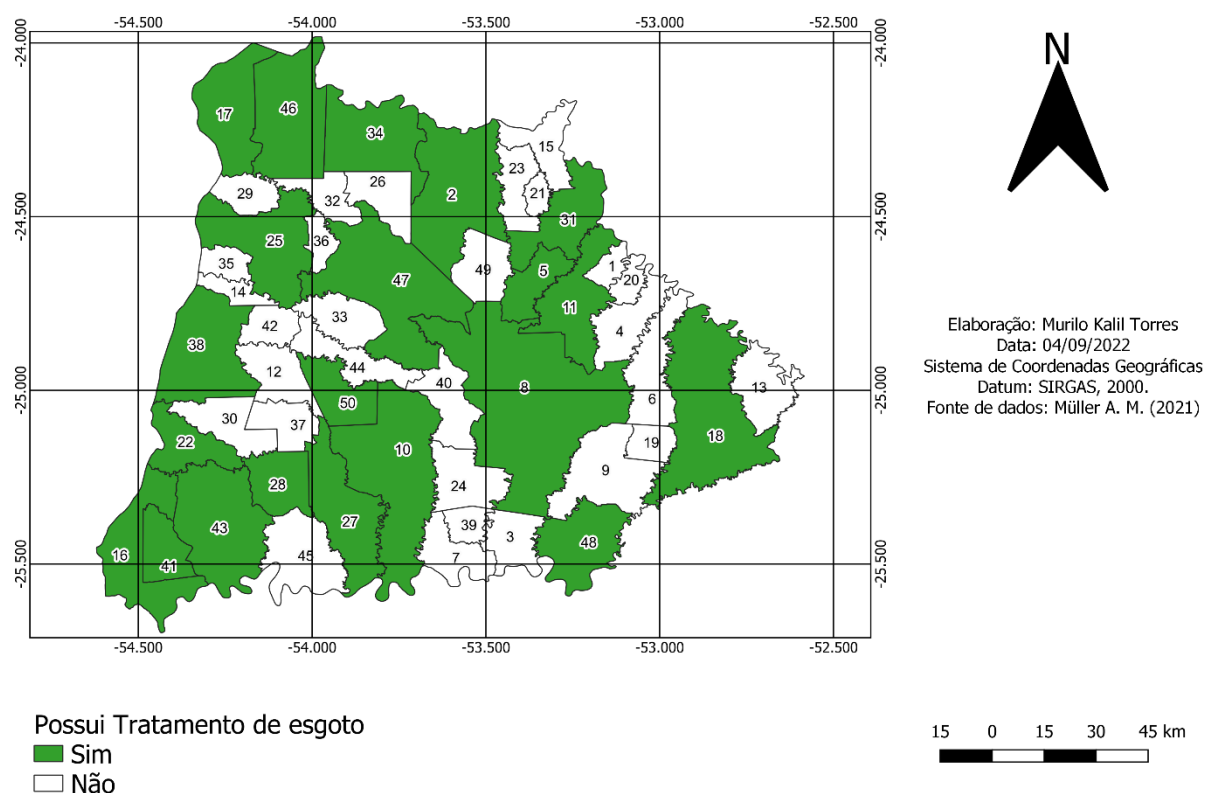
5.1.2 Resultado da caracterização dos sistemas de esgotamento sanitário

Cada município do Oeste Paranaense apresenta particularidades quanto a geração e tratamento do esgoto doméstico da população.

A realidade do Estado demonstra um cenário em que ainda existem números significativos de municípios que não apresentam qualquer tipo de tratamento para o esgoto gerado.

Na Figura 4, estão representados os municípios que apresentam sistema de tratamento de esgoto doméstico em seus territórios.

Figura 4 - Mapa dos municípios do Oeste do Paraná que possuem tratamento de esgoto



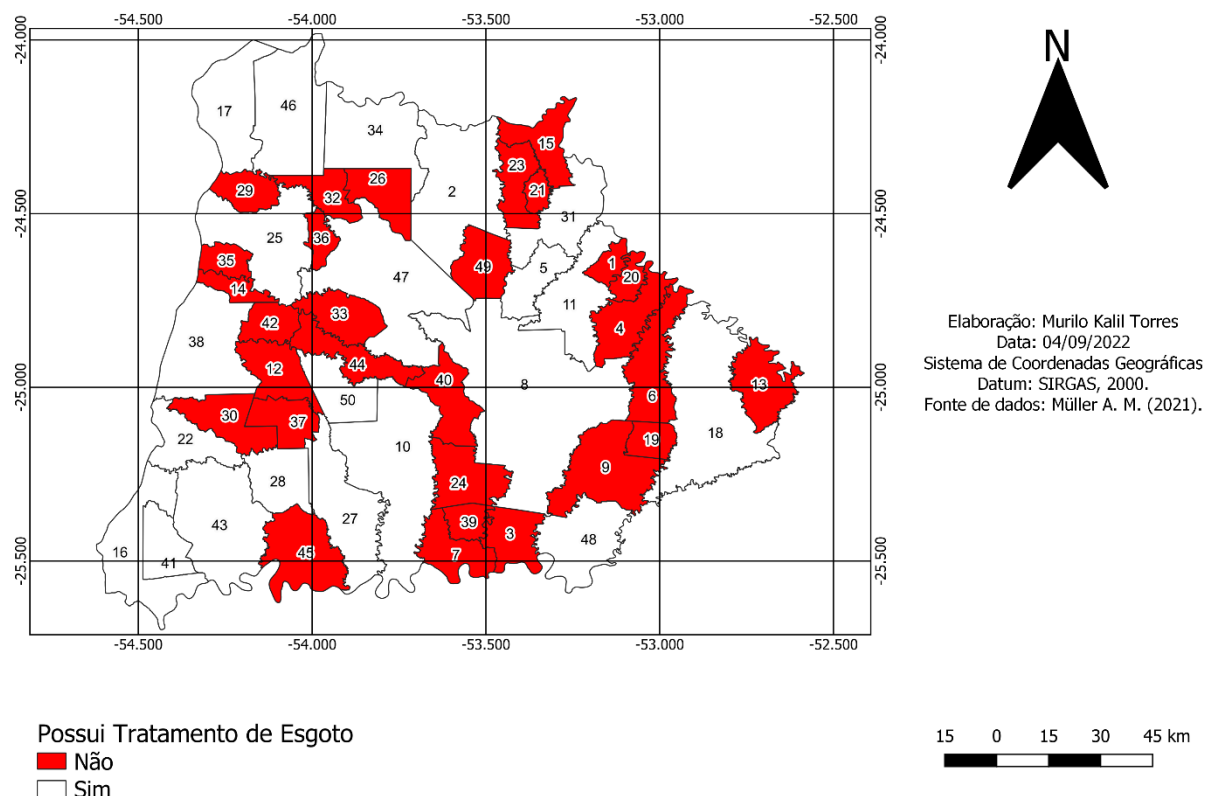
Fonte: Aútoria própria (2022).

Avaliando os resultados, é possível perceber que dos 50 municípios da mesorregião, 21 deles apresentam algum tipo de tratamento de esgoto doméstico, representando 42%. Se comparado com os dados populacionais, já apresentado anteriormente, percebe-se que todos os municípios com população maior de 20.000 habitantes, apresentam algum tipo de sistema de tratamento de esgoto, o que permite

concluir que os municípios que não apresentam sistemas de tratamento de esgoto são aqueles com baixa população (<20.000 habitantes).

Em oposição a Figura 4, na Figura 5 estão representados os municípios do Oeste paranaense que não apresentam qualquer tipo de sistema de tratamento de esgoto doméstico.

Figura 5 - Mapa dos municípios do Oeste do Paraná que não possuem tratamento de esgoto

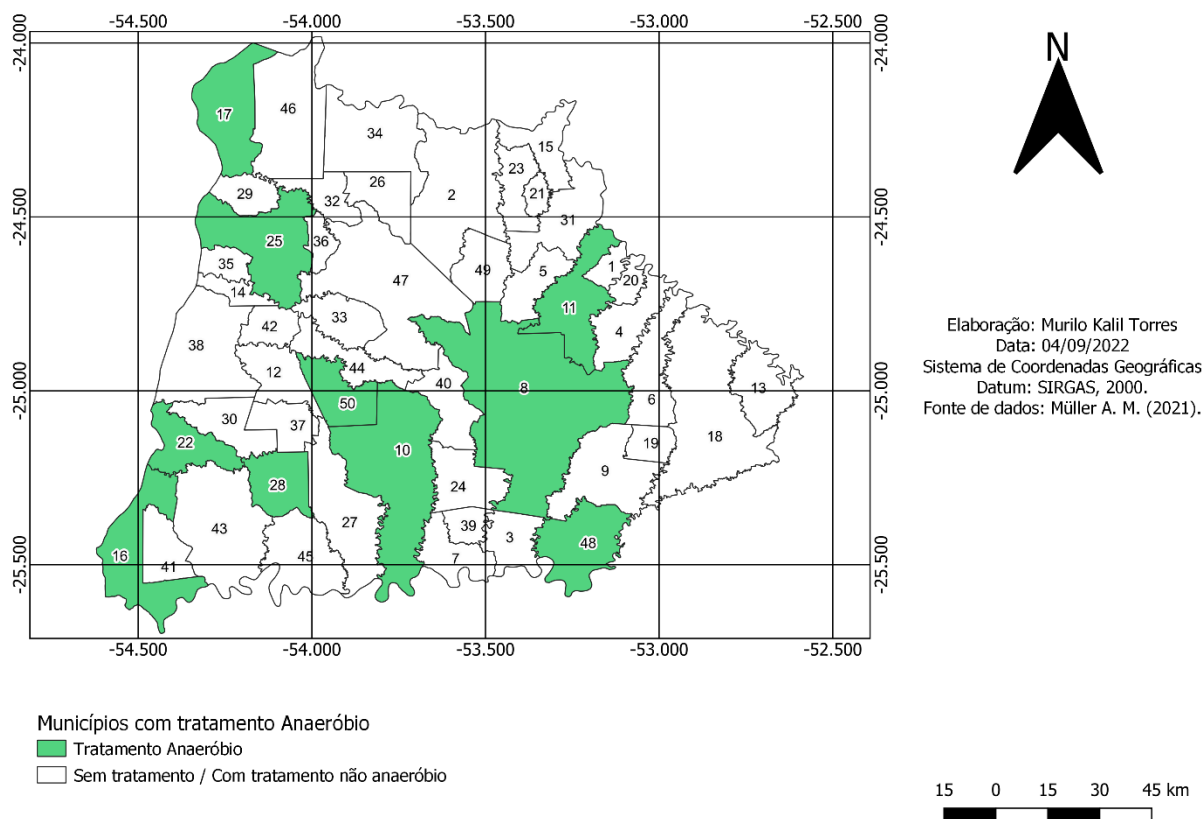


Fonte: Autoria própria (2022).

Os municípios sem tratamento de esgoto representam 58% de toda a mesorregião Oeste, garantindo um cenário onde a maioria dos municípios apresentam fragilidades relacionadas às questões sanitárias de tratamento de esgoto.

Como o objetivo do presente trabalho é avaliar e caracterizar o potencial de geração de energia a partir do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto estritamente anaeróbios, não se pode deixar de considerar os municípios que já apresentam esse tipo de tratamento de esgoto, como é demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Mapa dos municípios do Oeste do Paraná que possuem tratamento anaeróbio de esgoto



Fonte: Autoria própria (2022).

Quando comparado a Figura 4 com a Figura 6, percebe-se que apenas 47,61% deles apresentam estações de tratamento de esgoto com sistemas anaeróbios de tratamento, onde apenas nos municípios 8, 10, 11, 16, 17, 22, 25, 28, 48 e 50 já existe tratamento de esgoto passível de geração e captação de biogás para a produção de energia elétrica, representando 20% dos municípios do Oeste do Paraná.

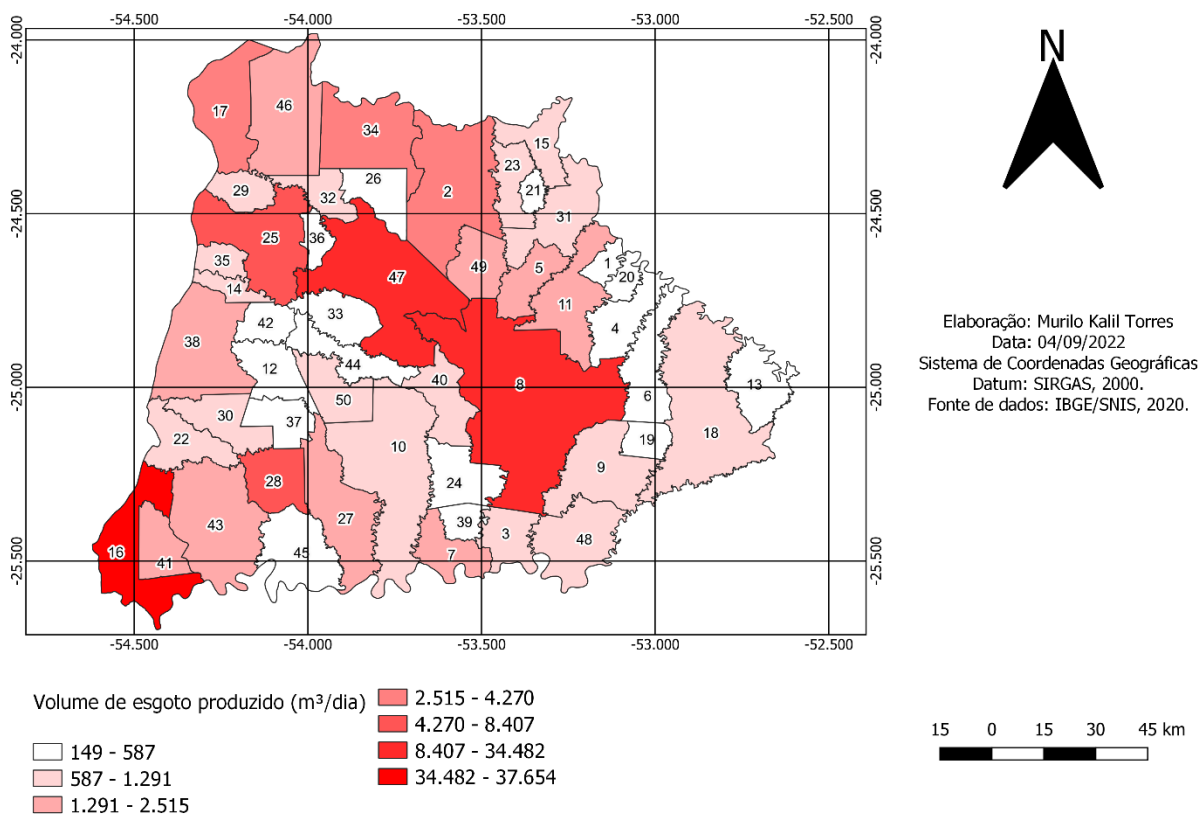
Vale ressaltar que 50% dos municípios com sistema de tratamento anaeróbio apresentam mais do que 20.000 habitantes, avaliação essa, permite indicar potenciais significativos para a produção de biogás a partir do tratamento anaeróbio.

5.1.3 Resultado da quantificação do volume de efluente gerado

Para os estudos de avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir de estações de tratamento anaeróbias, é indispensável a avaliação do volume de geração de esgoto em cada município analisado, uma vez que a estimativa do

potencial de geração de metano é diretamente relacionada a esse dado. Na Figura 7 estão representados os municípios da mesorregião Oeste do Paraná e suas quantificações volumétricas (m^3/dia) do esgoto gerado segundo dados disponibilizados pelo SNIS (2020).

Figura 7 - Mapa do volume de esgoto doméstico gerado pelos municípios do Oeste do Paraná



Fonte: Autoria própria (2022).

Analisando o mapa, é possível avaliar que em Cascavel (8), Foz do Iguaçu (16) e Toledo (47), há uma produção volumétrica bastante expressiva quando comparado com os demais municípios da região estudada, com volumes que se encontram no intervalo de 16.395 a 37.654 m^3/dia . De modo geral, quando comparado aos dados populacionais, nota-se que a produção volumétrica de esgoto doméstico está diretamente ligada ao número de habitantes de cada município. Os municípios que apresentam população inferior a 20.000 habitantes apresentam uma média de produção diária de 1.276,42 m^3/dia de esgoto doméstico, o que difere muito da média

dos três maiores municípios da região, onde a média diária de esgoto produzido é de 29.510,33 m³/dia.

A média de produção volumétrica de esgoto na região Oeste do Paraná é de 3.043,52 m³/dia e a mediana é 824,36 m³/dia, onde 84% dos municípios apresentam geração inferior à média da mesorregião para a produção desse efluente.

Os municípios que geram menos do que 587 m³/dia representam 34% de todo o cenário estudado, além de apresentarem baixa densidade populacional, com populações que variam de 6.370 (Ibema) a 2.251 (Iracema do Oeste) habitantes.

Quando avaliada a produção volumétrica de esgoto doméstico de cada municípios, percebe-se que os três municípios (8, 16 e 47) que apresentaram maior vazão diária, se somados, resultam em um percentual de aproximadamente 139% de toda a produção volumétrica dos demais municípios juntos, o que reforça ainda mais a relevância do espectro de geração de metano nos municípios mais populosos.

5.2 Resultado da estimativa da geração de gás

Os cálculos da estimativa de geração de metano descritos por Chernicharo *et al.* (1999) foram realizados utilizando a ferramenta Excel.

A discussão dos resultados referentes ao potencial de geração de CH₄ dos municípios do Oeste paranaense está dividida em três avaliações distintas: Análise dos municípios com tratamento anaeróbio em suas ETE, o que demonstra um cenário de potencial de geração de metano com estruturas já existentes; Análise dos municípios sem tratamento de esgoto, o que permite a avaliação de um cenário onde não existe qualquer estrutura de coleta e tratamento de esgoto, gerando assim uma reflexão sobre uma possível viabilidade ou não da instalação de ETE anaeróbias; e por último a Análise dos municípios que apresentam ETE em suas dependências, porém essas não utilizam sistema de tratamento anaeróbio, o que permite uma reflexão sobre um cenário possível caso houvesse o tratamento anaeróbio em suas ETE.

5.2.1 Resultado para municípios com tratamento anaeróbio – cenário para curto prazo

Os municípios que apresentam sistema anaeróbio para o tratamento do esgoto doméstico gerado, são passíveis de produção e captação do CH₄ produzido nessas ETEs. Dentre os municípios do Oeste do Paraná estudados, os que apresentam tais características são os municípios de 8, 10, 11, 16, 17, 22, 25, 28, 48 e 50.

Para os cálculos de estimativa de produção de CH₄ de cada um desses municípios, foi considerado o índice de coleta de esgoto específico de cada município com tratamento anaeróbio. Os índices estão constantes na Tabela 2.

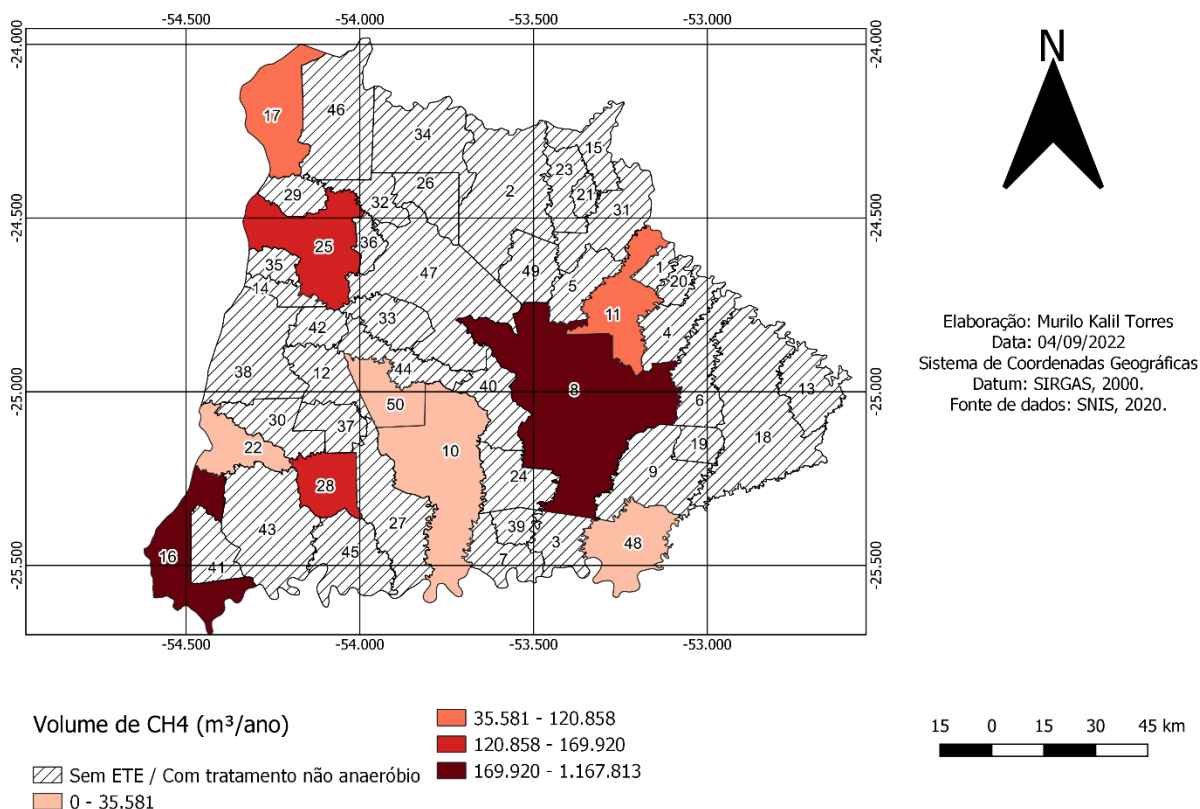
Tabela 2 - Índice de coleta de esgoto de cada município

ID	Município	Índice de coleta de esgoto
8	Cascavel	100%
10	Céu Azul	75%
11	Corbélia	60%
16	Foz do Iguaçu	80%
17	Guaíra	71%
22	Itaipulândia	42%
25	Marechal Cândido Rondon	20%
28	Medianeira	41%
48	Três Barras do Paraná	63%
50	Vera Cruz do Oeste	74%

Fonte: Autoria Própria (2022)

A Figura 8 representa a produção volumétrica de CH₄ estimada para os municípios que apresentam sistemas anaeróbios para o tratamento de esgoto doméstico.

Figura 8 - Mapa da produção volumétrica de metano dos municípios com tratamento anaeróbio



Fonte: Autoria própria (2022).

No mapa, estão hachurados os municípios que não apresentam estações de tratamento de esgoto ou estações de tratamento de esgoto não anaeróbio, já os municípios com tratamento anaeróbio de esgoto apresentam colorações relativas ao intervalo das classes definidas no mapa.

Avaliando o apresentado na Figura 8, percebe-se que dos 50 municípios estudados, apenas 10 apresentam sistemas de tratamento de esgoto que possibilitam a produção e captação de CH₄, o que representa apenas 20% do Oeste paranaense.

Porém vale ressaltar que esses mesmos 20% de municípios, juntos produzem 2.855.850,9 m³/ano de CH₄, representando 45,63% de toda o potencial de produção da mesorregião. Tal análise permite concluir que uma pequena parcela da região Oeste do Paraná, apresenta alto potencial de geração de CH₄ proveniente do esgotamento doméstico, o que demonstra um cenário de alta potencialidade de geração de metano para a região inteira.

A população atendida por ETE com sistema de tratamento anaeróbio é de 784.773 habitantes, representando 59,33% de toda a população da mesorregião Oeste do Paraná. Além disso, dos 10 municípios que apresentam esse sistema de tratamento de esgoto, 5 deles apresentam população inferior a 20.000 habitantes, os quais são municípios de pequeno porte.

O mapa apresenta um cenário onde os municípios que apresentam sistemas anaeróbios para o tratamento de esgoto estão rodeados por municípios que não apresentam tratamento de esgoto ou apresenta algum tipo de tratamento diferente do anaeróbio.

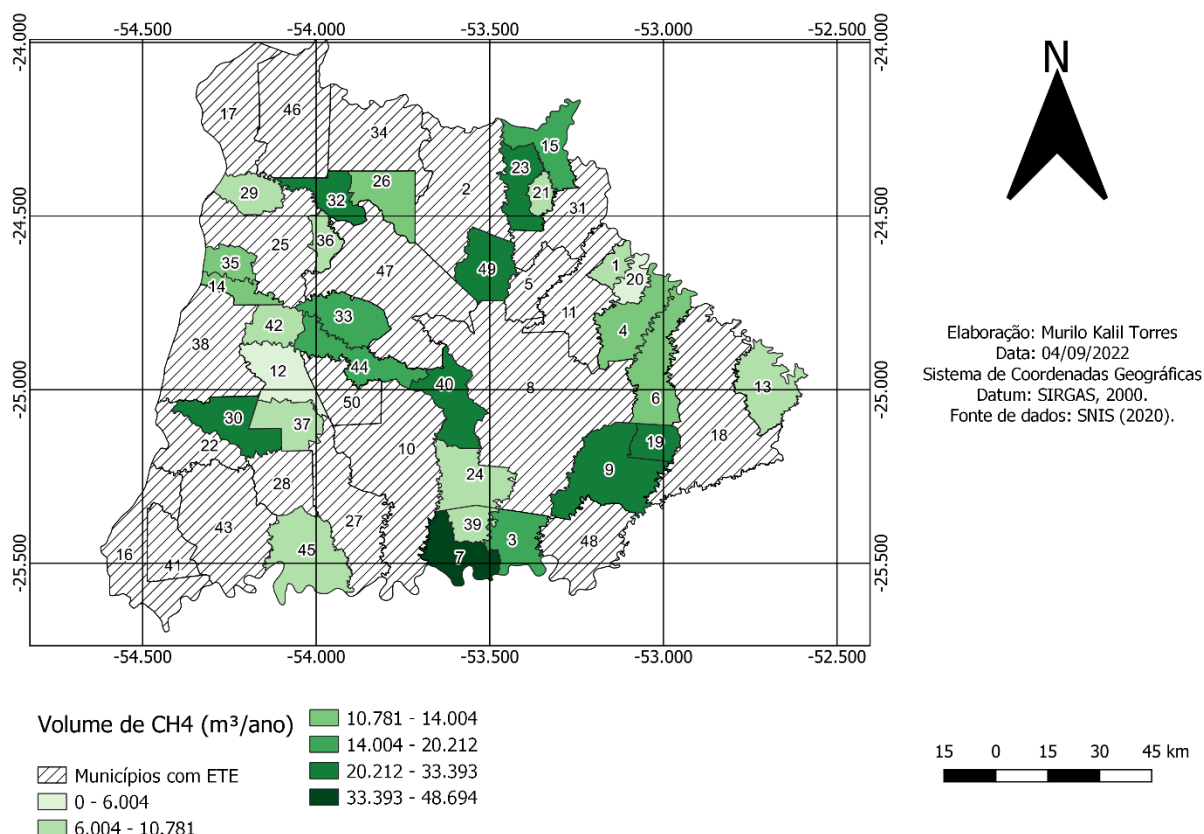
Tal fato permite considerar a análise da viabilidade da unificação de ETE unificadas entre os municípios hachurados no mapa, possibilitando assim um maior aproveitamento do esgoto gerado pela região como um todo.

5.2.2 Resultados para os municípios sem tratamento – cenário para médio prazo

A avaliação do potencial de produção de CH₄ em municípios que não apresentam quaisquer estações de tratamento de esgoto é uma estratégia para demonstrar ao leitor um cenário hipotético, onde são apresentados dados e estimativas referentes a situação caso houvessem estruturas de tratamento de esgoto estritamente anaeróbios em cada um desses municípios.

Diferentemente dos municípios que apresentam algum tipo de tratamento de esgoto doméstico, para os que não apresentam ETE foi considerado um cenário hipotético onde o índice de coleta de esgoto seria de 100%. Dessa forma, os valores de potencial de geração de metano para municípios sem tratamento de esgoto estão representados na Figura 9.

Os municípios hachurados são aqueles que apresentam ETE, independentemente do tipo de sistema de tratamento de esgoto doméstico, já os que apresentam tonalidade verde são aqueles que não apresentam qualquer estação de tratamento de esgoto.

Figura 9 - Mapa da produção volumétrica de metano dos municípios sem tratamento de esgoto

Fonte: Autoria própria (2022).

Avaliando a Figura 9, percebe-se que dos 50 municípios da mesorregião Oeste do Paraná, 29 deles (1, 3, 4, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 23, 24, 26, 29, 30, 32, 33, 35, 36, 37, 39, 40, 42, 44, 45 e 49) não apresentam qualquer tipo de estrutura para o tratamento do esgoto doméstico, representando um percentual de 58%, ou seja, a maioria dos municípios da região estudada não apresentam ETE. Tal fato possibilita a reflexão sobre o quanto o Oeste do Paraná ainda pode avançar no quesito potencial de geração de metano e conseqüentemente energia elétrica.

Os municípios não atendidos por ETE contemplam uma população de 175.272 habitantes, representando apenas 13% de toda a população do Oeste do Estado. Tais dados permitem reforçar o fato de que a maioria dos municípios do Oeste paranaense são de pequeno porte, uma vez que mais da metade (58%) dos municípios não apresentam coleta e tratamento de esgoto, mas mesmo assim esse percentual não é expressivo quando avaliada a população desses municípios.

O potencial hipotético de geração de metano para os municípios sem tratamento de esgoto é de 474.732,30 m³/ano, representando uma parcela de 10,62% de todo o potencial do Oeste do Paraná.

5.2.3 Resultado para municípios com outros tipos de tratamento – cenário para longo prazo

A avaliação do potencial de geração de CH₄ para os municípios com tratamento diferente do anaeróbio permite demonstrar um cenário hipotético caso houvesse ETE com sistemas de tratamento de esgoto estritamente anaeróbios.

Os valores volumétricos de geração de efluente doméstico de cada município avaliado nesse tópico são exatamente aqueles que já chegam as ETEs existentes no município, porém estas não apresentam tratamento anaeróbio do esgoto doméstico, impossibilitando assim a produção de metano.

Para os cálculos de estimativa de produção de CH₄ de cada um desses municípios, foi considerado o índice de coleta de esgoto específico de cada município com tratamento não anaeróbio. Os índices estão constantes na Tabela 3.

Tabela 3 - Índice de coleta de esgoto dos municípios com outro tipo de tratamento

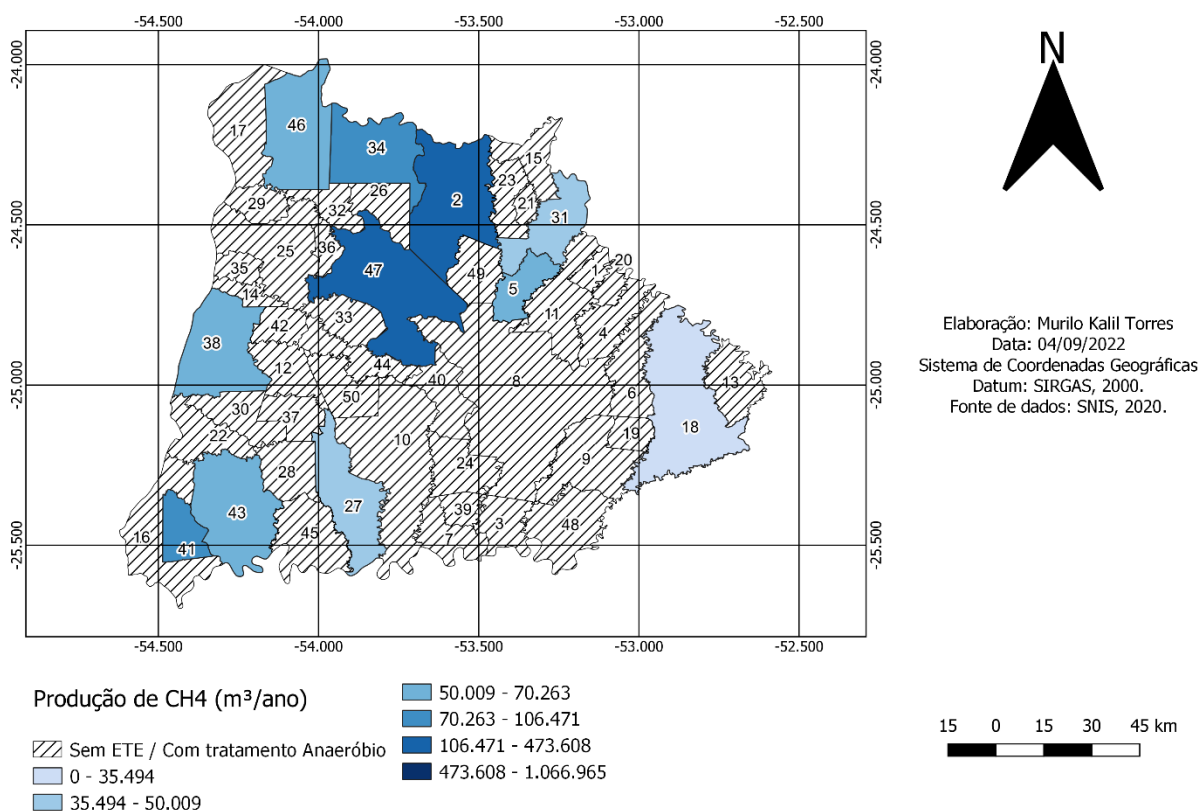
ID	Município	Índice de coleta de esgoto
2	Assis Chateaubriand	38%
5	Cafelândia	84%
18	Guaraniaçu	51%
27	Matelândia	68%
31	Nova Aurora	51%
34	Palotina	60%

ID	Município	Índice de coleta de esgoto
38	Santa Helena	82%
41	Santa Terezinha de Itaipu	87%
43	São Miguel do Iguçu	68%
46	Terra Roxa	63%
47	Toledo	79%

Fonte: Autoria Própria (2022)

Os dados do cenário hipotético tratado nesse tópico estão dispostos na Figura 10, onde estão constantes o potencial de geração de CH₄ para os municípios que apresentam tratamento de esgoto diferente do anaeróbio.

Figura 10 - Mapa da produção volumétrica de metano dos municípios com tratamento não anaeróbio



Fonte: Autoria própria (2022).

Os municípios hachurados são aqueles que não apresentam qualquer sistema para o tratamento de esgoto doméstico ou aqueles que apresentam estações de tratamento de esgoto com sistemas anaeróbios para tratar o esgoto doméstico coletado.

Avaliando a Figura 10 é possível perceber que dos 50 municípios presentes na mesorregião Oeste do Paraná, 11 deles (2, 5, 18, 27, 31, 34, 38, 41, 43, 46 e 47) apresentam estações de tratamento de esgoto não anaeróbias, representando 22% de toda a mesorregião. Vale ressaltar que esses mesmos 22% de municípios com tratamento de esgoto não anaeróbio, juntos contemplam um potencial de 1.160.779,3 m³/ano, representando um percentual de 25,84% de toda a produção da região Oeste do Paraná.

Os municípios que apresentam estações de tratamento de esgoto não anaeróbias apresentam uma população de 362.749 habitantes, representando 27,42% de toda a população da mesorregião avaliada.

5.3 Resultado do potencial de geração de energia elétrica

Os resultados obtidos acerca da estimativa da produção energética dos municípios do Oeste do Paraná compreendem o propósito final dessa pesquisa, avaliando e pontuando locais já apresentam esses potenciais reais, além de locais que ainda requerem investimentos para que haja produção energética a partir do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto doméstico estritamente anaeróbias.

Os cálculos realizados para a estimativa da geração de energia elétrica foram obtidos seguindo a metodologia descrita por Chernicharo *et al.* (1999), utilizando a ferramenta Excel.

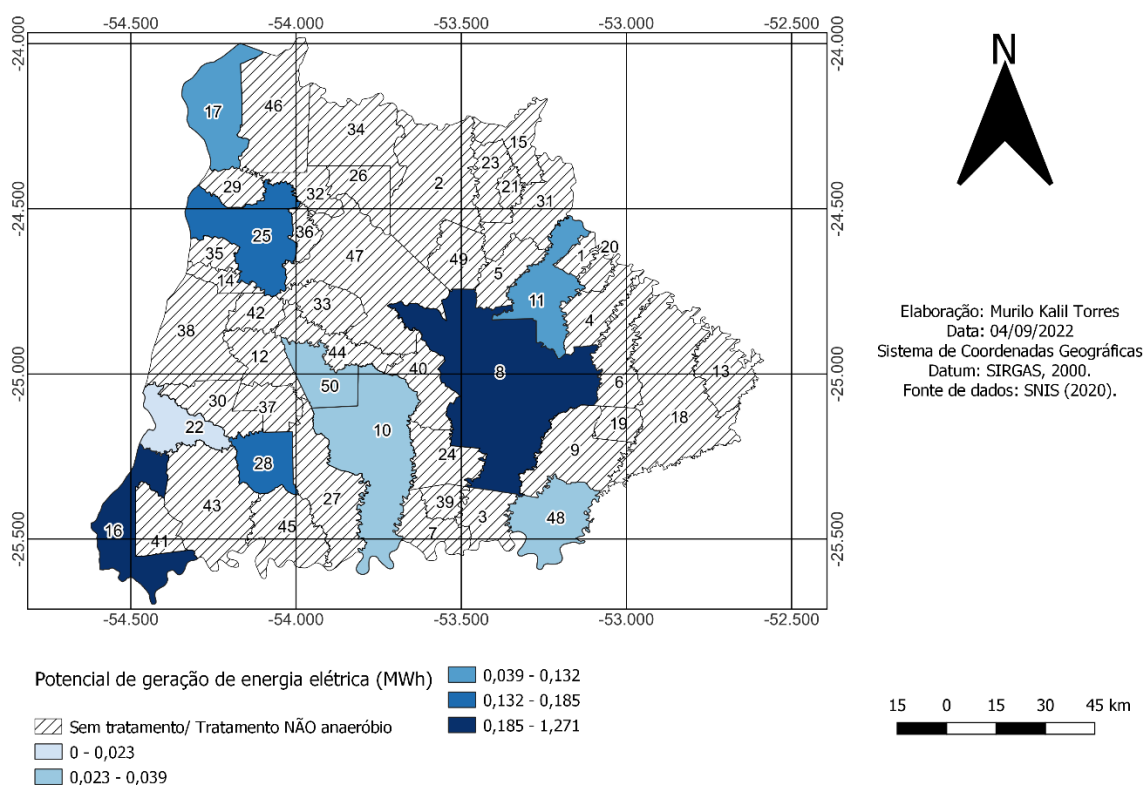
Assim como nos tópicos referentes à estimativa de produção de CH₄, o presente tópico que trata da estimativa de geração de energia elétrica está dividido em três cenários distintos descrito na metodologia.

5.3.1 Resultado para municípios com tratamento anaeróbio – cenário para curto prazo

O cenário do potencial de geração de energia elétrica dos municípios com tratamento anaeróbio já existente garante demonstrar o real potencial de aproveitamento energético do biogás, uma vez que a técnica para o tratamento do efluente doméstico já proporciona a geração desse gás.

Como já demonstrado anteriormente, os municípios que apresentam esse tipo de sistema de tratamento de esgoto são os municípios 8, 10, 11, 16, 17, 22, 25, 28, 48 e 50 como apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Mapa do potencial de geração de energia elétrica dos municípios com tratamento anaeróbio



Fonte: Autoria própria (2022).

Percebe-se que os municípios com os maiores potenciais para esse cenário foram Cascavel (8) e Foz do Iguaçu (16), o que era um resultado esperado, uma vez que o potencial de geração de energia elétrica está diretamente ligado à produção volumétrica de esgoto, que por sua vez está relacionada com o número de habitantes, visto que Cascavel e Foz do Iguaçu são os municípios com maiores

populações quando comparado com os demais municípios que apresentam sistema anaeróbio de tratamento de esgoto.

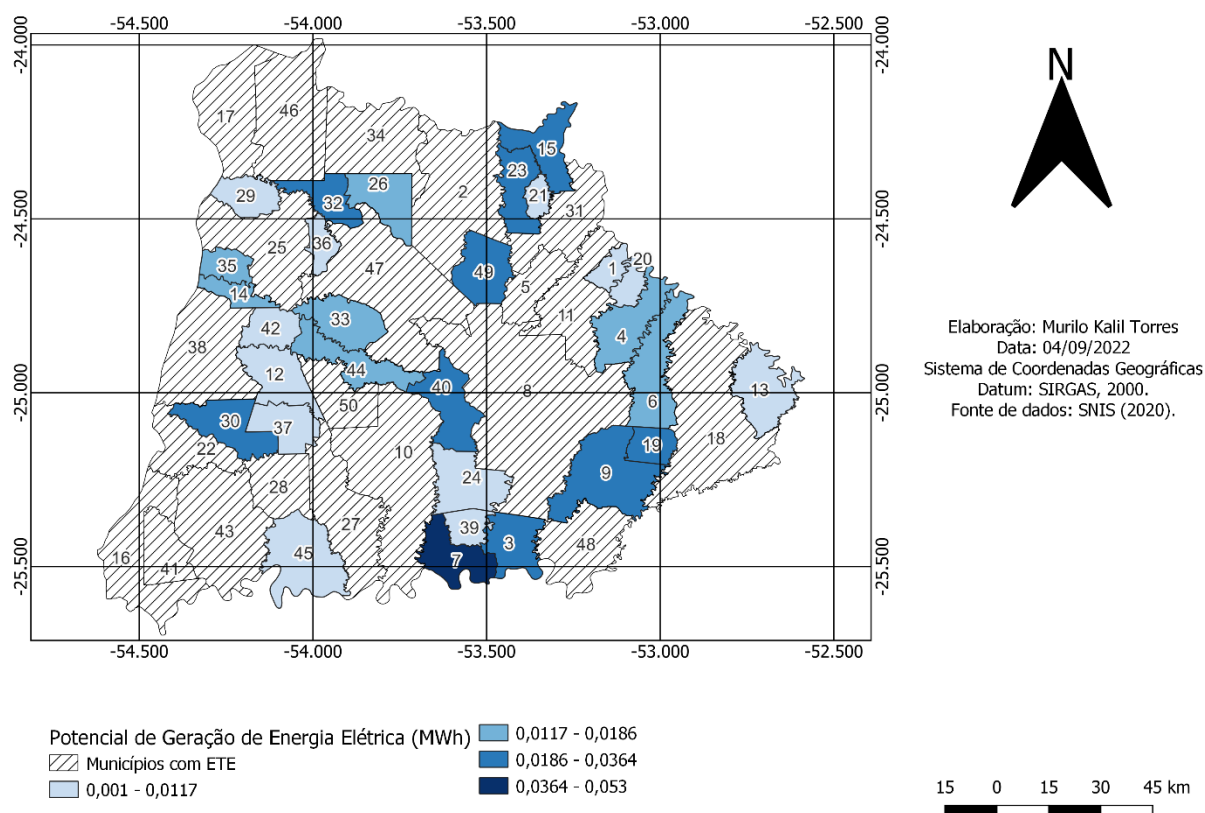
Cascavel apresenta um potencial de geração de energia elétrica de 1,2713 MWh, a qual representa 65,28% do potencial de todos os municípios que apresentam tratamento anaeróbio de esgoto doméstico. Já Foz do Iguaçu apresenta um potencial de geração de energia elétrica de 1,1616 MWh, representando 23,74% dos demais municípios desse cenário.

5.3.2 Resultado para municípios sem tratamento – cenário para médio prazo

Os resultados apresentados para o cenário dos municípios que não apresentam quaisquer sistemas de tratamento de esgoto, vem com o intuito de apresentar um cenário hipotético de como seria o potencial de geração de energia elétrica de cada um desses municípios caso os mesmos contassem com estruturas de tratamento de esgoto estritamente anaeróbias.

Essa avaliação é muito importante pois permite que os resultados obtidos sejam utilizados como ferramenta para a análise de viabilidade de implementação de ETE anaeróbias.

Figura 12 - Mapa do potencial de geração de energia elétrica dos municípios sem tratamento de esgoto



Fonte: Autoria própria (2022).

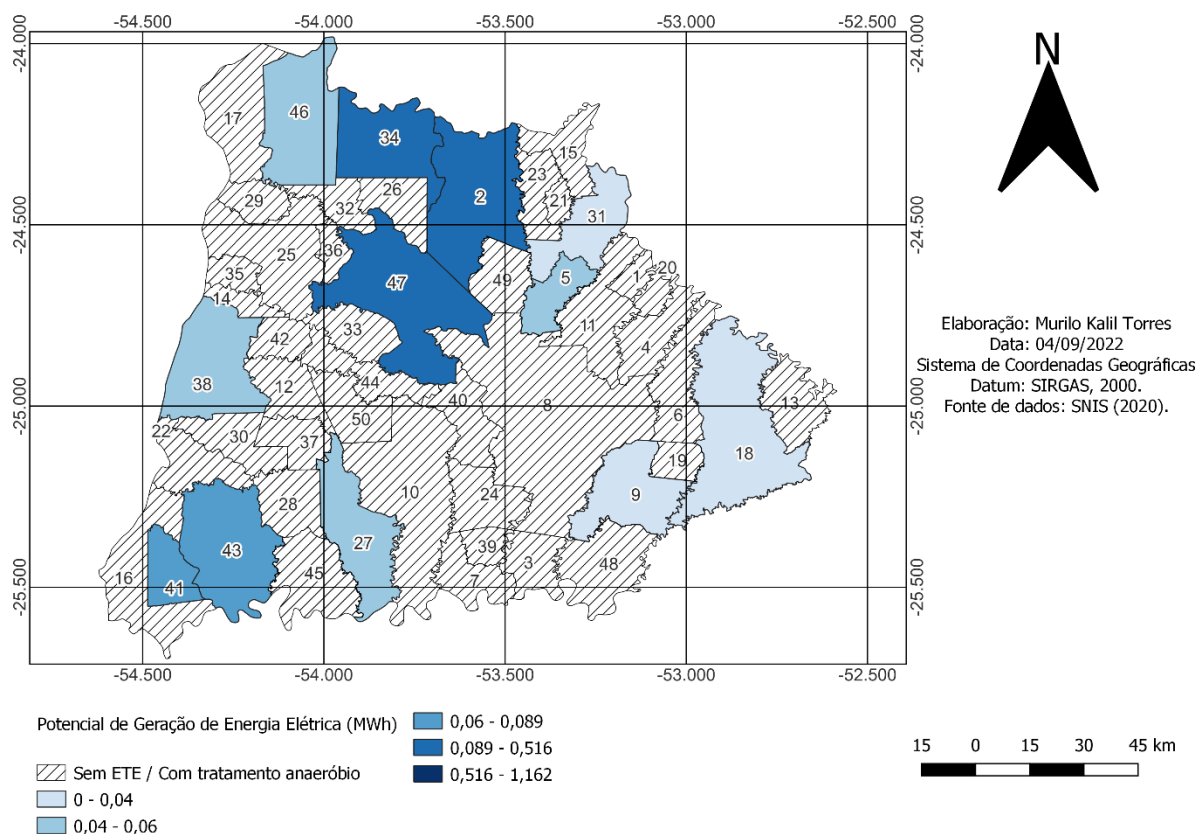
A Figura 12 demonstra que dos municípios pertencentes a esse cenário, Capitão Leônidas Marques (7), foi o que apresentou o maior potencial de geração de energia elétrica, apresentando um potencial de geração de 0,0530 MWh, o qual representa 10,26% da produção estimada para todos os municípios sem tratamento de esgoto.

Doze dos municípios sem tratamento apresentaram produção menor ou igual a 0,0117 MWh, onde juntos representam um potencial de geração de 0,1182 MWh, sendo 22,87% da produção de todos os municípios desse cenário.

5.3.3 Resultado para municípios com outros tipos de tratamento – cenário para longo prazo

A Figura 13 apresenta os potenciais de geração de energia elétrica para os municípios do terceiro cenário.

Figura 13 - Mapa do potencial de geração de energia elétrica dos municípios com tratamento não anaeróbio



Fonte: Autoria própria (2022).

Os municípios de Assis Chateaubriand (2), Palotina (34) e Toledo (47) apresentaram potencial de geração de eletricidade significativa quando comparado com os demais municípios do cenário, juntos apresentam potencial de 0,764 MWh, o que representa 60,24% dos municípios com tratamento diferente do anaeróbio.

Os resultados referentes ao cenário dos municípios com outros tipos de tratamento de esgoto apresentam o mesmo propósito do tópico anterior, referente aos municípios sem tratamento de esgoto. Isso porque os valores gerados de potencial de geração de energia elétrica apresentam um cenário hipotético caso os municípios tivessem sistemas de tratamento de esgoto estritamente anaeróbios, servindo assim

como ferramenta para outros estudos a análises da viabilidade de investimentos para a utilização de tratamento anaeróbio nas estações de tratamento de esgoto.

5.4 Resultado da síntese analítica do estudo

Nesse tópico serão apresentados todos os principais resultados sistematizados de forma unifica, o que permite uma análise mais clara e objetiva de toda a pesquisa realizada.

Na Tabela 4 estão dispostos os resultados finais de estimativa de geração de CH₄, além da relação entre potencial de geração de energia elétrica e consumo do município. Vale ressaltar que na Tabela 4 estão englobados todos os cenários avaliados: municípios que apresentam sistema de tratamento anaeróbio de esgoto (1º cenário), municípios sem qualquer tratamento (2º cenário) e tratamento não anaeróbio (3º cenário).

Tabela 4 - Relação entre geração e consumo de energia elétrica de cada município do Oeste do Paraná

Município	Cenário	Produção de CH ₄ (m ³ /ano)	Potencial de geração de energia elétrica (MWh)	Consumo do município (MWh)	Geração/consumo	Geração per capita (MWh/hab)	Consumo per capita (MWh/hab)
Anahy	2º	8.732,24	0,0095	6.595	0,000144%	3,41.10 ⁻⁰⁶	2,3655
Assis Chateaubriand	3º	121.749,53	0,1325	101.425	0,000131%	3,98.10 ⁻⁰⁶	3,0421
Boa Vista da Aparecida	2º	20.212,12	0,0220	15.541	0,000142%	2,92.10 ⁻⁰⁶	2,0611
Braganey	2º	14.003,87	0,0152	8.621	0,000177%	2,83.10 ⁻⁰⁶	1,6018
Cafelândia	3º	54.828,83	0,0597	180.294	0,000033%	3,23.10 ⁻⁰⁶	9,7689
Campo Bonito	2º	11.794,92	0,0128	6.339	0,000203%	3,41.10 ⁻⁰⁶	1,6846
Capitão Leônidas Marques	2º	48.694,20	0,0530	31.129	0,000170%	3,35.10 ⁻⁰⁶	1,9660
Cascavel	1º	1.167.813,15	1,2713	848.680	0,000150%	3,83.10 ⁻⁰⁶	2,5537
Catanduvas	2º	25.317,60	0,0276	16.841	0,000164%	2,71.10 ⁻⁰⁶	1,6564
Céu Azul	1º	35.580,57	0,0387	50.566	0,000077%	3,28.10 ⁻⁰⁶	4,2784
Corbélia	1º	58.867,29	0,0641	44.352	0,000144%	3,74.10 ⁻⁰⁶	2,5911
Diamante D Oeste	2º	5.846,32	0,0064	7.636	0,000083%	1,86.10 ⁻⁰⁶	2,2301

Município	Cenário	Produção de CH ₄ (m ³ /ano)	Potencial de geração de energia elétrica (MWh)	Consumo do município (MWh)	Geração/consumo	Geração per capita (MWh/hab)	Consumo per capita (MWh/hab)
Diamante do Sul	2º	10.780,65	0,0117	3.157	0,000372%	2,23.10 ⁻⁰⁶	0,5995
Entre Rios do Oeste	2º	11.553,56	0,0126	21.606	0,000058%	2,74.10 ⁻⁰⁶	4,7010
Formosa do Oeste	2º	20.076,90	0,0219	25.332	0,000086%	3,38.10 ⁻⁰⁶	3,9214
Foz do Iguaçu	1º	1.066.964,62	1,1616	583.151	0,000199%	4,5.10 ⁻⁰⁶	2,2581
Guaira	1º	120.857,71	0,1316	76.073	0,000173%	3,95.10 ⁻⁰⁶	2,2838
Guaraniaçu	3º	35.493,74	0,0386	22.713	0,000170%	3,16.10 ⁻⁰⁶	1,8591
Ibema	2º	23.701,93	0,0258	10.169	0,000254%	4,05.10 ⁻⁰⁶	1,5964
Iguatu	2º	6.004,48	0,0065	3.367	0,000194%	2,9.10 ⁻⁰⁶	1,4945
Iracema do Oeste	2º	8.111,64	0,0088	5.427	0,000163%	3,92.10 ⁻⁰⁶	2,4109
Itaipulândia	1º	21.192,08	0,0231	45.243	0,000051%	2,03.10 ⁻⁰⁶	3,9739
Jesuítas	2º	24.931,02	0,0271	34.828	0,000078%	3,26.10 ⁻⁰⁶	4,1810
Lindoeste	2º	9.591,41	0,0104	8.213	0,000127%	2,27.10 ⁻⁰⁶	1,7885
Marechal Cândido Rondon	1º	169.919,82	0,1850	265.449	0,000070%	3,46.10 ⁻⁰⁶	4,9621
Maripá	2º	13.600,70	0,0148	40.798	0,000036%	2,65.10 ⁻⁰⁶	7,3088

Município	Cenário	Produção de CH ₄ (m ³ /ano)	Potencial de geração de energia elétrica (MWh)	Consumo do município (MWh)	Geração/consumo	Geração per capita (MWh/hab)	Consumo per capita (MWh/hab)
Matelândia	3º	50.009,06	0,0544	151.175	0,000036%	3,01.10 ⁻⁰⁶	8,3490
Medianeira	1º	160.906,42	0,1752	206.958	0,000085%	3,76.10 ⁻⁰⁶	4,4436
Mercedes	2º	10.505,42	0,0114	25.953	0,000044%	2,05.10 ⁻⁰⁶	4,6536
Missal	2º	22.841,98	0,0249	34.002	0,000073%	2,32.10 ⁻⁰⁶	3,1766
Nova Aurora	3º	36.539,49	0,0398	71.216	0,000056%	3,86.10 ⁻⁰⁶	6,9148
Nova Santa Rosa	2º	22.735,99	0,0248	40.252	0,000061%	2,99.10 ⁻⁰⁶	4,8696
Ouro Verde do Oeste	2º	17.118,86	0,0186	19.053	0,000098%	3,1.10 ⁻⁰⁶	3,1671
Palotina	3º	106.471,35	0,1159	277.954	0,000042%	3,61.10 ⁻⁰⁶	8,6533
Pato Bragado	2º	13.112,20	0,0143	19.053	0,000075%	2,51.10 ⁻⁰⁶	3,3520
Quatro Pontes	2º	10.366,76	0,0113	25.425	0,000044%	2,8.10 ⁻⁰⁶	6,3105
Ramilândia	2º	8.708,04	0,0095	7.533	0,000126%	2,12.10 ⁻⁰⁶	1,6830
Santa Helena	3º	54.717,81	0,0596	105.345	0,000057%	2,23.10 ⁻⁰⁶	3,9356
Santa Lúcia	2º	10.504,84	0,0114	9.242	0,000124%	3,02.10 ⁻⁰⁶	2,4366
Santa Tereza do Oeste	2º	33.393,47	0,0364	36.342	0,000100%	3,6.10 ⁻⁰⁶	3,5996

Município	Cenário	Produção de CH ₄ (m ³ /ano)	Potencial de geração de energia elétrica (MWh)	Consumo do município (MWh)	Geração/consumo	Geração per capita (MWh/hab)	Consumo per capita (MWh/hab)
Santa Terezinha de Itaipu	3º	81.596,66	0,0888	46.518	0,000191%	3,75.10 ⁻⁰⁶	1,9629
São José das Palmeiras	2º	9.966,29	0,0108	6.406	0,000169%	2,99.10 ⁻⁰⁶	1,7662
São Miguel do Iguaçu	3º	70.262,74	0,0765	80.985	0,000094%	2,77.10 ⁻⁰⁶	2,9368
São Pedro do Iguaçu	2º	16.515,82	0,0180	11.715	0,000153%	3,09.10 ⁻⁰⁶	2,0129
Serranópolis do Iguaçu	2º	9.669,33	0,0105	16.069	0,000066%	2,35.10 ⁻⁰⁶	3,5892
Terra Roxa	3º	54.310,07	0,0591	48.737	0,000121%	3,37.10 ⁻⁰⁶	2,7815
Toledo	3º	473.607,93	0,5156	651.973	0,000079%	3,61.10 ⁻⁰⁶	4,5706
Três Barras do Paraná	1º	25.522,09	0,0278	30.120	0,000092%	2,31.10 ⁻⁰⁶	2,5021
Tupãssi	2º	26.339,74	0,0287	32.361	0,000089%	3,54.10 ⁻⁰⁶	3,9908
Vera Cruz do Oeste	1º	28.227,14	0,0307	17.686	0,000174%	3,63.10 ⁻⁰⁶	2,0920

Fonte: Autoria Própria (2022)

Vale ressaltar que assim como descrito na metodologia da pesquisa, os valores estimados para a produção real de CH₄ apresentados na Tabela 4, já contam com a perda de 36,36% dos valores calculados pelas equações utilizadas.

Conforme relatado em diversas pesquisas acerca do potencial do aproveitamento energético do biogás proveniente da biomassa, é sabido que esse tipo de fonte energética ainda é incipiente no cenário nacional, porém esse cenário tem mostrado avanços otimistas (Agencia Brasil, 2021).

Ao observar os valores expressos na Tabela 4, podemos perceber que o potencial de geração de energia elétrica dos cenários avaliados garante uma pequena produção com relação ao consumo dos municípios.

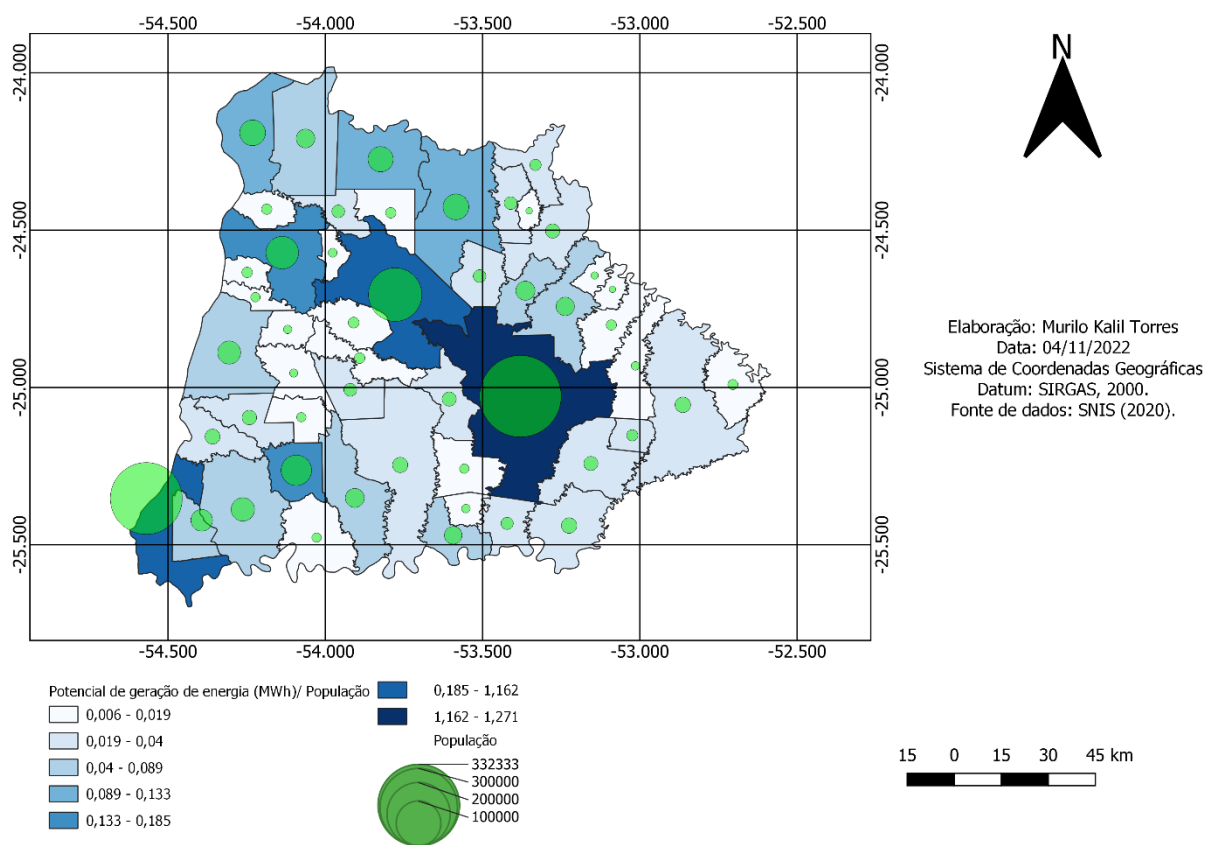
Comparado aos diversos setores com potencial de geração de biogás, o saneamento representa um percentual de 6,1% (EPE, 2021), reafirmando o cenário de pouco desenvolvimento para o aproveitamento energético. Tal fato permite concluir que o aproveitamento energético do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto ainda avançara significativamente, viabilizando esse tipo de tecnologia para um futuro próximo.

Quando comparados todos os municípios estudados, Cascavel se apresenta como o município que apresenta o maior potencial de geração de energia elétrica de todo o Oeste do Paraná, o que acompanha o índice populacional. Além disso o município já conta com sistemas de tratamento de esgoto estritamente anaeróbios, logo, a coleta de biogás e a sua queima para geração de energia elétrica é uma realidade possível e muito próxima.

Os municípios com índices populacionais inferiores a 20.000 habitantes apresentam um potencial de geração ainda menor que os municípios mais populosos. Uma forma de otimizar o potencial de geração de energia elétrica proveniente do biogás das ETE seria a centralização de redes de tratamento de esgoto, isso garante que os efluentes domésticos produzidos por esses municípios sejam destinados a estações de tratamento unificadas, possibilitando uma maior coleta de efluente, gerando assim maiores volumes de metano e conseqüentemente energia elétrica. Além disso, a média do potencial de geração de energia elétrica *per capita* apresentou o valor de 3,10899E-06 MWh/hab, garantindo uma pequena produção.

Reforçando a afirmativa supracitada, a Figura 14 apresenta os dados da estimativa do potencial de geração de energia elétrica de todos os cenários juntos, aliado a diagramas de pizza demonstrando os índices populacionais de cada município.

Figura 14 - Mapa da relação entre o potencial de geração de energia elétrica e índices populacionais



Por fim, avaliando os três cenários de forma unificada, é possível considerar que o potencial de geração de energia elétrica a partir do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário doméstico produzido pela população ainda é prematuro quando comparado com a necessidade de consumo de cada município, porém, como já afirmado anteriormente, este trabalho serve como uma ferramenta para a otimização de técnicas e tecnologias de aproveitamento energético do biogás, permitindo a avaliação de regiões de maior ou menor potencial de aproveitamento energético, contribuindo assim para um futuro onde a geração de energia elétrica acompanha preceitos da sustentabilidade global.

6 CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados a partir do aproveitamento energético do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto do Oeste do Paraná foi possível concluir que os municípios dessa mesorregião que apresentaram maiores potenciais de geração de energia elétrica foram Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo. Tal relação está estreitamente relacionada com os aspectos populacionais, uma vez que esses três municípios apresentam as maiores populações do Oeste do Paraná.

Também foi possível concluir que dos três cenários avaliados, os municípios que apresentam tratamentos anaeróbios garantem o maior potencial de geração de energia elétrica, contando com uma geração de 3,1090 MWh, onde o consumo é de 2.168.278 MWh. Isso pode estar relacionado com o fato de os municípios de Cascavel e Foz do Iguaçu pertencerem a esse cenário.

Por fim, é possível concluir que o cenário do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em estações de tratamento estritamente anaeróbias é prematuro quando comparado com a demanda energética de cada um dos 50 municípios estudados, porém esse estudo serve como ferramenta de otimização de tecnologias que viabilizem o aproveitamento energético em estações de tratamento de esgoto anaeróbias no Oeste do Paraná.

Uma importante consideração a ser prestada é o favorecimento ao cumprimento da Agenda 2030, sobretudo, aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7) que trata da geração de energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos. Além disso, para o cumprimento da Agenda 2030, o Brasil deve focar em expandir a infraestrutura e o aprimoramento de tecnologias para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis.

Além disso, a utilização para a geração de energia elétrica da biomassa carbonácea presente em esgotamento sanitário contribui diretamente para a disseminação de saúde pública de qualidade e também para a conservação do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. **Produtos da Biomassa representaram 9% da energia elétrica em 2018**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-12/produtos-da-biomassa-representaram-9-da-energia-eletrica-em-2018>. Acesso em: 04 nov. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL. **Brasil enfrenta a pior crise hídrica em 91 anos**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/economia/audio/2021-09/brasil-enfrenta-pior-crise-hidrica-em-91-anos>. Acesso em: 10 nov. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2ª edição. Brasília: ANEEL, 2005, 243 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 96481: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro, p. 1. 1986.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; reatores anaeróbios**. Belo Horizonte – MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, ed. 1, v. 5, 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5**. Belo Horizonte – MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG. 2ª ed., 2007. 380 p.

DA COSTA, David Freire. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. Programa de Interunidade de Pós-Graduação em Energia PIPGE. Universidade de São Paulo – USP. 2006.

DA SILVA LOBATO, Livia Cristina. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, p. 1-187. 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional. Relatório Síntese 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 04 nov. 2022.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de Saneamento**. 5ª edição. Brasília: FUNASA, 2019, 545 p.: il.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malhas territoriais (2021)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao->

do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto. Acesso em: 04 nov. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017: Abastecimento de água e esgotamento sanitário**. Rio de Janeiro. 2020.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **O que é PIBIOGÁS?**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/pibioogas>. Acesso em: 14 dez. 2021.

MÜLLER, Angela Maria et al. **Diagnóstico do sistema de esgotamento sanitário dos 50 municípios do Oeste do Paraná e proposição de modelo de gestão**. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – PPGCA. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2021.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J.M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.E. (2006) **Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery**. Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology, v. 5, p. 93-114.

PECORA, Vanessa. **Implementação de uma unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: estudo de caso**. 2006. 152 p. Dissertação (Mestrado em Ciências), Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PEROVANO, TIAGO GOLLNER; FORMIGONI, L. P. A. **Geração de energia a partir de Subprodutos do Tratamento de Esgotos Sanitários**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). UFES, 2011.

ROSA, André Pereira et al. **Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira)**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21, p. 315-328, 2016.

SANEPAR. **Unidade de biodigestão vai usar lodo para produzir energia elétrica**. 2015. Disponível em: <https://site.sanepar.com.br/noticias/unidade-de-biodigestao-vai-usar-lodo-para-produzir-energia-eletrica>. Acesso em: 14 dez. 2021.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Oportunidade da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná**. Curitiba: Senai/PR. 2016. 144p.

SILVA, Thaisa Carolina Ferreira. **Utilização de biogás de estações de tratamento de esgoto para fins energéticos**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

APÊNDICE A - Temperatura média anual e TDH de cada município

TEMPERATURA MÉDIA ANUAL E TDH DE CADA MUNICÍPIO

ID	Município	Temperatura média anual (°C)	TDH (h)
1	Anahy	21,1	7,5
2	Assis Chateaubriand	22	7,5
3	Boa Vista da Aparecida	21,1	7,5
4	Braganey	20,2	7,5
5	Cafelândia	21	7,5
6	Campo Bonito	19,6	14
7	Capitão Leônidas Marques	21,4	7,5
8	Cascavel	20	7,5
9	Catanduvas	19,6	14
10	Céu Azul	20,7	7,5
11	Corbélia	20,2	7,5
12	Diamante D Oeste	22,1	7,5
13	Diamante do Sul	20,1	7,5
14	Entre Rios do Oeste	22,6	7,5
15	Formosa do Oeste	22,1	7,5
16	Foz do Iguaçu	22,4	7,5
17	Guaíra	22,7	7,5

ID	Município	Temperatura média anual (°C)	TDH (h)
18	Guaraniaçu	19,3	14
19	Ibema	19,4	14
20	Iguatu	20,6	7,5
21	Iracema do Oeste	21,8	7,5
22	Itaipulândia	22,8	7,5
23	Jesuítas	21,8	7,5
24	Lindoeste	20,9	7,5
25	Marechal Cândido Rondon	22,4	7,5
26	Maripá	22,2	7,5
27	Matelândia	21,2	7,5
28	Medianeira	21,9	7,5
29	Mercedes	22,7	7,5
30	Missal	22,4	7,5
31	Nova Aurora	21,4	7,5
32	Nova Santa Rosa	22,3	7,5
33	Ouro Verde do Oeste	21,5	7,5
34	Palotina	22,6	7,5
35	Pato Bragado	22,6	7,5

ID	Município	Temperatura média anual (°C)	TDH (h)
36	Quatro Pontes	22,2	7,5
37	Ramilândia	21,3	7,5
38	Santa Helena	22,8	7,5
39	Santa Lúcia	21,2	7,5
40	Santa Tereza do Oeste	21,5	7,5
41	Santa Terezinha de Itaipu	22,2	7,5
42	São José das Palmeiras	22,2	7,5
43	São Miguel do Iguaçu	22,2	7,5
44	São Pedro do Iguaçu	21,5	7,5
45	Serranópolis do Iguaçu	21,9	7,5
46	Terra Roxa	22,6	7,5
47	Toledo	21	7,5
48	Três Barras do Paraná	20,7	7,5
49	Tupãssi	21,1	7,5
50	Vera Cruz do Oeste	21	7,5