



UNIVERSIDADE TECNÓLOGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MULTICAMPI APUCARANA E LONDRINA

LETÍCIA GUARNIÉRI VAZ

POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E GASES DE EFEITO ESTUFA NO
SETOR AGROPECUÁRIO INDUSTRIAL BRASILEIRO

LONDRINA
2023

LETICIA GUARNIÉRI VAZ

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E GASES DE EFEITO ESTUFA NO
SETOR AGROPECUÁRIO INDUSTRIAL BRASILEIRO**

**ENERGY POTENTIAL OF BIOGAS AND GREENHOUSE GASES IN THE
BRAZILIAN AGRICULTURAL INDUSTRIAL SECTOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental / multicampi Apucarana e Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.
Área de Concentração: Engenharia Ambiental.
Orientador(a): Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi.

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/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). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



LETICIA GUARNIERI VAZ

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR
AGROPECUÁRIO
INDUSTRIAL BRASILEIRO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 28 de Fevereiro de 2023

Dr. Ricardo Nagamine Costanzi, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Bruno De Oliveira Freitas, Doutorado - Universidade Tecnológica

Federal do Paraná Dr. Dib Gebara, Doutorado - Universidade Estadual

Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 01/03/2023.

À minha família, pelo incentivo, apoio e carinho em todos os momentos, possibilitando que meus sonhos se tornassem alcançáveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me proporcionar saúde e discernimento para superar o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi, pela paciência, incentivo e orientações, bem como pela dedicação com que me guiou durante a elaboração deste trabalho, sua ajuda foi fundamental.

À Secretaria do Programa PPGEA, pela assistência e cooperação.

À minha família, em especial aos meus pais e meu esposo, pois sem o apoio deles seria muito difícil vencer essa etapa da minha vida.

VAZ, Leticia Guarniéri. Potencial energético do biogás e gases de efeito estufa no setor agropecuário industrial brasileiro. 2023. 124 p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2023.

RESUMO

O consumo de energia tem aumentado em um mundo globalizado devido ao aumento da população urbana e ao uso de novas tecnologias, aumentando os efeitos do aquecimento global. Assim, visando reduzir os impactos ambientais, o uso de fontes de energia renovável tem recebido maior investimento. O biogás tem tido destaque nos últimos anos pela possibilidade de sua geração a partir de resíduos orgânicos pelo processo de digestão anaeróbia. Entretanto, ainda é pouco explorado se comparado com seu potencial devido à falta de incentivos, políticas públicas e de tecnologia adequada. Em decorrência desse cenário, o presente estudo objetivou avaliar a geração de gases de efeito estufa e o potencial energético do biogás no Brasil a partir dos resíduos da cadeia agropecuária industrial no setor de suinocultura, bovinocultura de leite e de abatedouros. Foram realizados levantamentos de dados da produção agropecuária no Brasil para determinar a geração potencial de biogás a partir dos sólidos voláteis, do potencial de geração de energia elétrica e do abatimento de gases de efeito estufa com o uso de biodigestores. Os resultados indicam um potencial de aumento na participação do biogás na matriz energética brasileira em cerca de 4 vezes, uma vez que atualmente, apenas 1,4% de energia elétrica renovável é originada do biogás. O Brasil tem potencial de gerar 17.095,66 GWh anualmente a partir da produção de biogás na cadeia agropecuária industrial estudada, bem como evitar a geração de 86,5 milhões de toneladas de CO₂ equivalente ao ano com a queima do biogás nos sistemas de biodigestores, o que corresponde a aproximadamente 554,5 milhões de árvores de reflorestamento. Desta forma, a inserção do uso de biodigestores como forma de tratamento de resíduos orgânicos da suinocultura, bovinocultura de leite e de abatedouros possui importância significativa para aumentar o uso de fontes renováveis de energia e a confiabilidade do setor de energia brasileiro.

Palavras-chave: Biodigestor; Resíduos Orgânicos; Processo Anaeróbio; Suinocultura; Abatedouro.

VAZ, Leticia Guarniéri. Energy potential of biogas and greenhouse gases in the Brazilian agricultural industrial sector. 2023. 124 p.. Dissertation (Master in Environmental Engineering) – Federal Technological University of Paraná, Londrina, 2023.

ABSTRACT

Energy consumption has been increasing in a globalized world due to the growth of urban populations and the use of new technologies, leading to increased effects of global warming. Therefore, aiming to reduce environmental impacts, the use of renewable energy sources has received greater investment. Biogas has gained prominence in recent years due to the possibility of its generation from organic waste through the anaerobic digestion process. However, it is still underexplored compared to its potential due to the lack of incentives, public policies, and adequate technology. As a result of this scenario, the present study aimed to evaluate the greenhouse gas generation and energy potential of biogas in Brazil from the waste of the industrial agricultural chain in the swine, dairy cattle, and slaughterhouse sectors. Data surveys of agricultural production in Brazil were conducted to determine the potential generation of biogas from volatile solids, the potential for electricity generation, and the reduction of greenhouse gases using biodigesters. The results indicate a potential increase in the participation of biogas in the Brazilian energy matrix by about 4 times since currently, only 1.4% of renewable electricity is derived from biogas. Brazil has the potential to generate 17,095.66 GWh annually from the production of biogas in the studied industrial agricultural chain, as well as avoid the generation of 86.5 million tons of CO₂ equivalent per year with the burning of biogas in biodigester systems, which corresponds to approximately 554.5 million reforestation trees. Thus, the insertion of the use of biodigesters as a form of treatment for organic waste from swine, dairy cattle, and slaughterhouses is of significant importance to increase the use of renewable energy sources and the reliability of the Brazilian energy sector.

Keywords: Biodigester; Organic Waste; Anaerobic Process; Swine Farming; Slaughterhouse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Processo de digestão anaeróbia apresentado em quatro fases distintas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese	20
Figura 2- Fontes de biogás	26
Figura 3- Países que citam resíduos animais como insumo para produção de biogás	28
Figura 4- Utilização do biogás.....	30
Figura 5- Emissões em porcentagem de CH ₄ pela fermentação entérica para diferentes espécies animais	34
Figura 6- Resíduos orgânicos	38
Figura 7- Boxplot da geração de água residuária de suínos em ciclo completo	46
Figura 8- Concentração de DBO em água residuária de suinocultura	47
Figura 9- Concentração de DQO em água residuária de suinocultura	48
Figura 10- Boxplot dos valores de concentração de sólidos voláteis em água residuária de suinocultura	49
Figura 11- Variável de conversão de sólidos voláteis para metano	51
Figura 12- Variável de conversão de sólidos voláteis para biogás	52
Figura 13- Abatimento anual de GEE a partir da suinocultura.....	55
Figura 14- Produção de metano a partir dos SV produzidos por estado no Brasil	56
Figura 15- Relação da demanda e geração de energia elétrica a partir do número de suínos por estado no Brasil.....	58
Figura 16- Potencial de geração de energia a partir do número de suínos em relação a demanda por estado no Brasil.	59
Figura 17- Box plot dos valores de concentração de sólidos voláteis em água residuária da bovinocultura.	61
Figura 18- Intervalo de confiança e desvio padrão da concentração de sólidos voláteis em água residuária da bovinocultura.	62
Figura 19- Box plot dos valores de vazão água residuária na bovinocultura	63
Figura 20- Intervalo de confiança e desvio padrão de valores de vazão água residuária na bovinocultura.	64
Figura 21- Variável de conversão de sólidos voláteis para metano na Bovinocultura	65
Figura 22- Intervalo de confiança e desvio padrão de valores de conversão de metano relativo aos SV na bovinocultura	66
Figura 23- Abatimento anual de gases de efeito estufa a partir da bovinocultura	67
Figura 24- Produção de metano a partir dos SV produzidos por estado no Brasil	68
Figura 25- Relação da demanda e geração de energia elétrica a partir do número de bovinos por estado no Brasil.....	69
Figura 26- Potencial de geração de energia a partir do número de bovinos em relação a demanda por estado no Brasil.	70
Figura 27- Abatimento anual de gases de efeito estufa a partir de abatedouro de aves.....	71
Figura 28- Produção de Biogás a partir do número de abate de aves e dos SV produzidos por estado no Brasil.	72

Figura 29- Relação da demanda e geração de energia elétrica a partir do número de abate de aves por estado no Brasil.....	74
Figura 30- Potencial de geração de energia a partir do abate de aves em relação a demanda por estado no Brasil.	75
Figura 31- Abatimento anual de gases de efeito estufa a partir de abatedouro de suínos e bovinos	76
Figura 32- Variação da concentração de SV em abatedouros	77
Figura 33- Produção de biogás a partir dos SV produzidos por estado no Brasil	79
Figura 34- Relação da demanda e geração de energia elétrica a partir do número de abate de suínos e bovinos por estado no Brasil	80
Figura 35- Potencial de geração de energia a partir do abate de suínos e bovinos em relação a demanda por estado no Brasil	81
Figura 36- Abatimento anual de gases de efeito estufa a partir do número de suínos, bovinos, abatedouro de aves, suínos e bovinos	82
Figura 37- Produção de biogás a partir dos SV produzidos por estado no Brasil	83
Figura 38- Potencial de geração de energia a partir do número de suínos, bovinos, abate de aves, suínos e bovinos em relação a demanda por estado no Brasil	84
Figura 39- Emissões de GEE do solo (CO₂eq) e estoques de C (CO₂eq) de compartimentos do fragmento florestal secundário no sul da Amazônia.....	85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Plantas de biogás em operação no Brasil por porte	18
Gráfico 2- Ranking das emissões estaduais de CO ₂ eq. do setor agropecuário em 2020.....	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Uso do biogás para geração de energia elétrica com uso próprio de cada setor e associado a Geração Distribuída	31
Quadro 2- Gases de efeito estufa evitados em formas correspondentes de biomassa.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição do biogás	21
Tabela 2- Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos	25
Tabela 3- Emissões de GEE no Brasil (tCO ₂)	34
Tabela 4- Análise descritiva para os parâmetros relacionados a geração de metano e biogás	44
Tabela 5- Emissões de GEE no Brasil 2020 (tCO ₂ e- GWP-AR5).....	53
Tabela 6- Análise descritiva de valores para as variáveis relacionadas a geração de metano/biogás para bovinocultura	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
B _o	Produção de Metano por Dejeito Produzido
B _{obio}	Variável de Transformação de Sólidos Voláteis para Biogás
B _{omet}	Variável de Transformação de Sólidos Voláteis para Metano
CV	Coefficiente de Variação
D	Valor estatístico de teste
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
D _{tab}	Valor estatístico de teste tabelado
EUA	Estados Unidos da América
FPCM	Correção da concentração de gordura e proteína do leite (Fat Protein Corrected Milk)
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWh	Gigawatt-hora
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
KWh	Quilowatt-hora
MJ	Megajoule
MWh	Megawatt-hora
Nm ³	Normal Metro Cúbico
SV	Sólidos Voláteis
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
TON	Tonelada
UE	União Européia
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo geral	16
1.1.1	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Breve histórico do biogás no Brasil	17
2.2	Biogás	19
2.2.1	Processo anaeróbio	19
<u>2.2.1.1</u>	<u>Fatores que influenciam na digestão anaerobia</u>	<u>21</u>
2.2.1.1.1	<i>Oxigênio</i>	21
2.2.1.1.2	<i>Temperatura</i>	22
2.2.1.1.3	<i>pH</i>	22
2.2.1.1.4	<i>Alcalinidade</i>	22
2.2.1.1.5	<i>Nutrientes</i>	23
2.2.1.1.6	<i>Metais residuais</i>	24
2.2.1.1.7	<i>Idade do lodo</i>	24
2.3	Fontes de biogas	25
2.3.1	Resíduos animais	26
2.4	Usos do biogas	29
2.4.1	Energia elétrica	31
2.4.2	Energia térmica	32
2.4.3	Biocombustível	32
2.5	Gases de efeito estufa (GEE)	33
3	METODOLOGIA	36
3.1	Sistema de busca e base de artigos científicos	36
3.1.1	Descritores suínos	36
3.1.2	Descritores bovinos	37
3.1.3	Descritores de abatedouro de aves, suínos e bovinos	37
3.2	Estrutura da Pesquisa ealizada na Cadeia agroindustrial da Suinocultura, Bovinocultura e Avicultura	38
3.3	Produção de Biogás da Cadeia agroindustrial da Suinocultura, Bovinocultura e Avicultura	39
3.4	Energia Potencial da Cadeia agroindustrial da Suinocultura, Bovinocultura e Avicultura	40
3.4.1	Energia elétrica	40

3.5	Gases de Efeito Estufa (GEE)	40
3.6	Área Florestal	41
3.7	Estatística Descritiva	41
4	RESULTADOS	44
4.1	Suinocultura	44
4.1.1	Estatística descritiva da biomassa da suinocultura.....	44
4.1.2	GEE do biogás da suinocultura	53
4.1.3	Produção potencial do metano no Brasil	56
4.1.4	Análise de energia a partir do biogás da suinocultura	57
4.2	Bovinocultura de leite	59
4.2.1	Estatística descritiva da biomassa da bovinocultura de leite.....	59
4.2.2	GEE do biogás da bovinocultura de leite	66
4.2.3	Análise da produção de metano a partir da biomassa da bovinocultura de leite	67
4.3	Abatedouro	70
4.3.1	Abatedouro aves	70
4.3.2	Abatedouro de suínos e bovinos	75
4.4	Soma dos mapas	81
4.5	Gases de Efeito Estufa	84
4.5.1	Área florestal	84
4.6	Contexto atual do uso de biogás	86
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A- Suinocultura	104
	APÊNDICE B- Bovinocultura	106
	APÊNDICE C- Abatedouro aves	108
	APÊNDICE D- Abatedouro suínos e bovinos	110
	APÊNDICE E- Dimensionamento dos sistemas de biodigestores	112

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o biogás é uma fonte de energia renovável amplamente utilizada em diversos países do mundo (DEVI et al., 2022). Ele é gerado a partir da biomassa, como os resíduos sólidos urbanos, industriais, agrícolas, florestais, e os excrementos de animais e de humanos; por meio de processos microbiológicos anaeróbios (VIEIRA; POLLI, 2020).

O Brasil é um grande produtor agrícola e de alimentos, podendo-se destacar a criação e exportação de aves, suínos e bovinos. Porém, o processo de criação e processamento da carne em associação com as agroindústrias geram grandes quantidades de resíduos sólidos e líquidos, os quais devem ser tratados e destinados corretamente a fim de evitar a degradação do meio ambiente e a contaminação do produto final a ser comercializado (PASQUAL; BOLLMANN; SCOTT, 2017).

Os resíduos agroindustriais da suinocultura, pecuária e avicultura são gerados em grande quantidade no país, mas ainda são pouco utilizados em larga escala para geração de biogás. Sua implantação e operação são influenciadas principalmente pelo desenvolvimento econômico e cultural do local, além de apresentar diferenças em relação a estrutura, custos e formas de uso (BAHRS; ANGENENDT, 2019).

A suinocultura é uma das principais atividades econômicas agropecuárias do Brasil, juntamente com os EUA, China e Europa. Porém, esta atividade gera grandes quantidades de resíduos orgânicos, nutrientes (fósforo, nitrogênio e potássio), metais pesados (cobre e zinco), patógenos e antibióticos (LINZ et al., 2020). Isto pode representar um grande risco de contaminação dos cursos d'água, solo e ar.

Em 2020, o Brasil obteve uma produção de 49,3 milhões de cabeças de suínos (IBGE 2022). Isto equivale a uma carga de $DBO_{5,20}$ produzida de aproximadamente 153.816 ton. DBO/d ou a uma carga orgânica gerada por uma população equivalente de 284,8 milhões de pessoas (adaptado de SPERLING, 2007; OLIVEIRA, 1993).

A produção de suínos no Brasil é responsável por 9% do total de gases de efeito estufa atribuído ao setor de agropecuária. Desta porção, 19% tem origem na produção de metano gerado pelo gerenciamento inadequado dos resíduos orgânicos (BILLOTA, 2019). Desta forma, emissões de gases de efeito estufa (GEE) como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O) são gerados nas

fazendas de suínos. O metano é o principal GEE produzido pelos resíduos orgânicos devido a ocorrência de processos anaeróbios.

Sobre os bovinos os Estados Unidos, Brasil e União Europeia totalizam quase 50% da produção mundial de carne, produzindo cerca de 19%, 15% e 13% do total respectivamente. Na UE estão presentes 89 milhões de bovinos, concentrados principalmente na França com 34,4 % (HOCQUETTE et al., 2018).

O Brasil obteve uma produção de 218,5 milhões de cabeças de bovinos em 2020, sendo 16,1 milhões de cabeças de vacas ordenhadas, produzindo cerca de 35,4 bilhões de litros de leite (IBGE 2020). O Centro-Oeste respondeu por 34,6% deste total, sendo que o maior crescimento ocorreu na região Norte. O estado do Mato Grosso possui o maior rebanho com 32,7 milhões de cabeças, enquanto Minas Gerais continua líder na produção de leite (IBGE 2020).

A bovinocultura é uma atividade econômica que gera grandes quantidades de resíduos orgânicos diariamente. A fermentação entérica, resultado do processo de digestão de celulose no rúmen de animais, como bovinos, emitem metano (CH_4) contribuindo para a produção de gases de efeito estufa (GEE).

Em 2020 o setor agropecuário (fermentação entérica, cultivo de arroz, manejo de dejetos animais, queima de resíduos agrícolas e solos manejados) totalizou 577 MtCO₂ equivalente, sendo a fermentação entérica o maior contribuinte com 65% do total. O GEE do setor de bovinos foi responsável pela emissão de 373 MtCO₂ equivalente. A criação de bovinos de corte e leite respondem por 96,9% dessas emissões (SEEG, 2021). Além disso, através das excretas (urina e esterco) produzem óxido nitroso a partir de nitrogênio (N₂O) (HOCQUETTE et al., 2018).

A carga orgânica produzida pelo rebanho de bovinos no Brasil é de aproximadamente 192.845 ton.DBO/d, que é equivalente a uma carga gerada por uma população de 357,12 milhões de pessoas (adaptado de SPERLING, 2007; CAMPOS, 2002).

Em 2020 o Brasil obteve a posição de terceiro maior produtor de aves do mundo, com 14,5 milhões de toneladas de carne de frango produzidas, sendo aproximadamente 6 bilhões de animais abatidos ao ano (IBGE, 2020). Os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul possuem os maiores índices de abate do país, com 35,5%, 15% e 14% respectivamente (EMBRAPA, 2020).

Uma forma eficiente de tratamento dos resíduos da pecuária é a digestão anaeróbia que é a principal forma de tratamento de águas residuárias utilizada para minimizar os impactos dos resíduos gerados na pecuária e na agroindústria (HERNANDEZ; JIMENEZ; GARCIA, 2018; D'AQUINO; MELLO; COSTA JÚNIOR, 2019). Assim, o aproveitamento energético do metano presente no biogás pode ser uma solução tecnológica (MADEIRA et al., 2017).

Neste contexto, a matriz energética brasileira é composta majoritariamente por fontes não renováveis, cerca de 55,3% e 44,7% da energia é proveniente das fontes renováveis, sendo a participação do biogás apenas 1,4% (BEN, 2022). Ou seja, o potencial energético da biomassa é pouco explorado atualmente no país, apesar de ser uma fonte alternativa de energia limpa, além de contribuir para preservação ambiental, reduzir o consumo de fontes fósseis de energia e auxiliar na geração de renda (FREITAS et al., 2019; FERREIRA et al., 2018).

Em larga escala os dejetos podem ocasionar impactos ambientais negativos ao solo, recursos hídricos e vegetação. Apesar disso, esses resíduos possuem alto potencial de utilização na produção de biogás e transformação em energia, podendo ser empregados na própria unidade onde foi gerado (DA SILVA et al., 2019) ou na forma de geração distribuída (GD).

Desde 2012, o Brasil inclui o biogás como uma forma de geração distribuída (GD) de acordo com a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015). O potencial da suinocultura para gerar energia a partir de pequenos produtores é destacável. Por isso, as políticas públicas devem incentivar a implementação de sistemas geradores de energia do tipo GD. A regulamentação da geração distribuída de energia deve ser baseada em variáveis como o preço básico da tarifa de energia, incentivos para projetos de microgeração de energia, taxas financeiras de desconto associadas à melhoria do setor comercial de suinocultura e seus impactos locais (BERNARDES et al. 2022).

A partir deste contexto foi realizada uma pesquisa sobre a potencialidade de geração de biogás visando explorar e elucidar formas de uso e aproveitamento energético sustentável no Brasil na cadeia agropecuária industrial. A cadeia agropecuária industrial estudada focou na criação e abate de bovinos, especificamente vacas leiteiras, criação e abate de suínos, além do abate de aves.

O Brasil apresenta um grande potencial para produção de biogás e abatimento de gases de efeito estufa a partir dos resíduos gerados pelo setor

agropecuário industrial, contribuindo para o aumento da sustentabilidade da matriz energética.

1.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial energético e de gás de efeito estufa a partir da geração e utilização do biogás como fonte de energia renovável na cadeia do setor agropecuário industrial da suinocultura, bovinocultura e avicultura do Brasil.

1.1.1 Objetivos específicos

- Levantar dados reais de resíduos do setor agropecuário industrial para cálculo do potencial de geração de energia a partir do biogás;
- Estimar a produção de biogás, abatimento de GEE, potencial de geração de energia elétrica com a oferta e a demanda ;
- Confeccionar mapas do Brasil com os dados obtidos por estado com Sistema de Informação Geográfico (SIG);
- Analisar formas de geração de energia elétrica a partir do biogás;
- Avaliar os gases de efeito estufa na forma equivalente de área e reflorestamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve histórico do biogás no Brasil

Na década de 1970, houve um incentivo de exploração de energias alternativas devido à crise do Petróleo promovido pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) (KARLSSON et al., 2014).

Na década de 1980, houve um aumento da instalação de biodigestores devido ao Programa de Mobilização Energética (PME) – Decreto 87.079, de 2 de abril de 1982; que devido à falta de conhecimento técnico e ausência de equipamentos, principalmente motogeradores, adequados para sistemas de biogás eficientes resultou em custos de produção de energia elevados e de baixa confiabilidade (CIBIOGÁS, 2021).

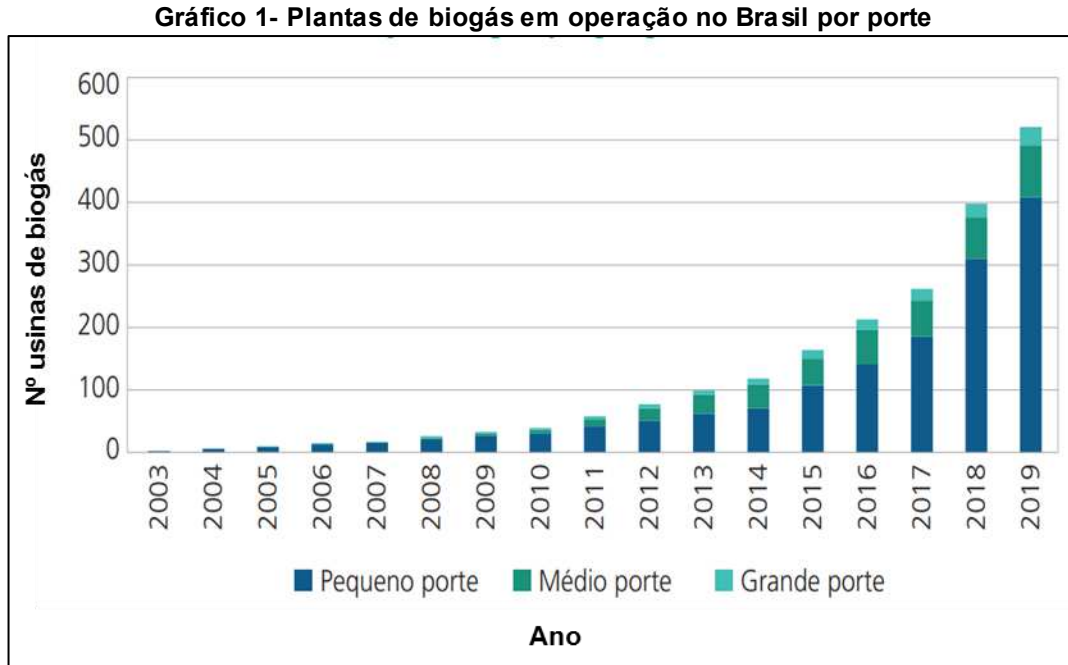
O uso do biogás no Brasil teve um grande incentivo a partir do ano de 2000, devido a criação e operação dos créditos de carbono. Assim, houve um aumento dos sistemas de produção de biogás principalmente a partir da suinocultura (KARLSSON et al., 2014).

Atualmente, a exploração de usinas de biogás tem sido incentivada devido principalmente aos fatores:

- Aquecimento global;
- Geração de gases de efeito estufa (GEE);
- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL);
- Investimento em créditos de carbono;
- Pesquisa e desenvolvimento de tecnologias em sistemas de biogás;
- Capacitação operacional;
- Incentivos governamentais;
- Crises de geração de energia no Brasil;
- Variação do custo de geração de energia no Brasil.

Assim, de acordo com estudos da CiBiogas, entre 2015 e 2018 houve um aumento de ceca de 117% no número de usinas de biogás em operação no Brasil. Em 2019 havia 400 usinas de biogás, representando um crescimento de 40% em

relação ao ano anterior (CIBIOGÁS, 2021). O gráfico 1 ilustra a evolução do número de sistemas de biogás em funcionamento no Brasil.



Fonte: Cibiogas (2021)

O setor agropecuário é o principal detentor de usinas de biogás, representando 78% do total em operação. Por outro lado, o setor industrial e o de Resíduos Sólidos e Efluentes Sanitários possuem, respectivamente, 13% e 9% das unidades. Embora o setor agropecuário seja responsável por grande parte das usinas, ele gera apenas 11% do volume diário total de biogás (CIBIOGÁS, 2021).

No Brasil, a maior aplicação do biogás é na geração de energia elétrica, contando com 86% das usinas de produção de biogás. A ANEEL regularizou a geração de energia elétrica originada do biogás por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, permitindo sua utilização nas redes de distribuição através da Geração Distribuída (GD).

No entanto, a energia renovável a partir do biogás corresponde a apenas 0,091% da matriz elétrica brasileira (BEN, 2020). O que significa um grande potencial inexplorado para produção de energia do tipo GD.

2.2 Biogás

O biogás é um composto rico em metano gerado pela transformação da matéria orgânica através do processo de digestão anaeróbia. Ele pode ser utilizado como fonte de energia alternativa, complementando e substituindo fontes tradicionais, como fósseis, hidrelétricas e termelétricas. Isso permite uma redução da dependência energética centralizada e uma maior flexibilidade na composição da matriz energética (HAKAWATI et al., 2017).

O biogás pode ser utilizado para produzir eletricidade através da conversão da energia química do gás em energia mecânica por meio da combustão em um gerador que produz energia elétrica (LIMA et al., 2017). A energia elétrica proveniente do biogás pode ser empregada para atender pequenas comunidades, propriedades rurais, processos industriais e a área urbana.

Muitos países estão procurando produzir energia de forma sustentável para aumentar a segurança energética e econômica do país. A Índia, por exemplo, tem como objetivo aumentar a produção de energia por meio de usinas de biogás (KADAM; PANWAR, 2017). Já a Itália utiliza o biogás gerado principalmente para gerar energia elétrica (DIMITROV; ZLATEVA, 2019).

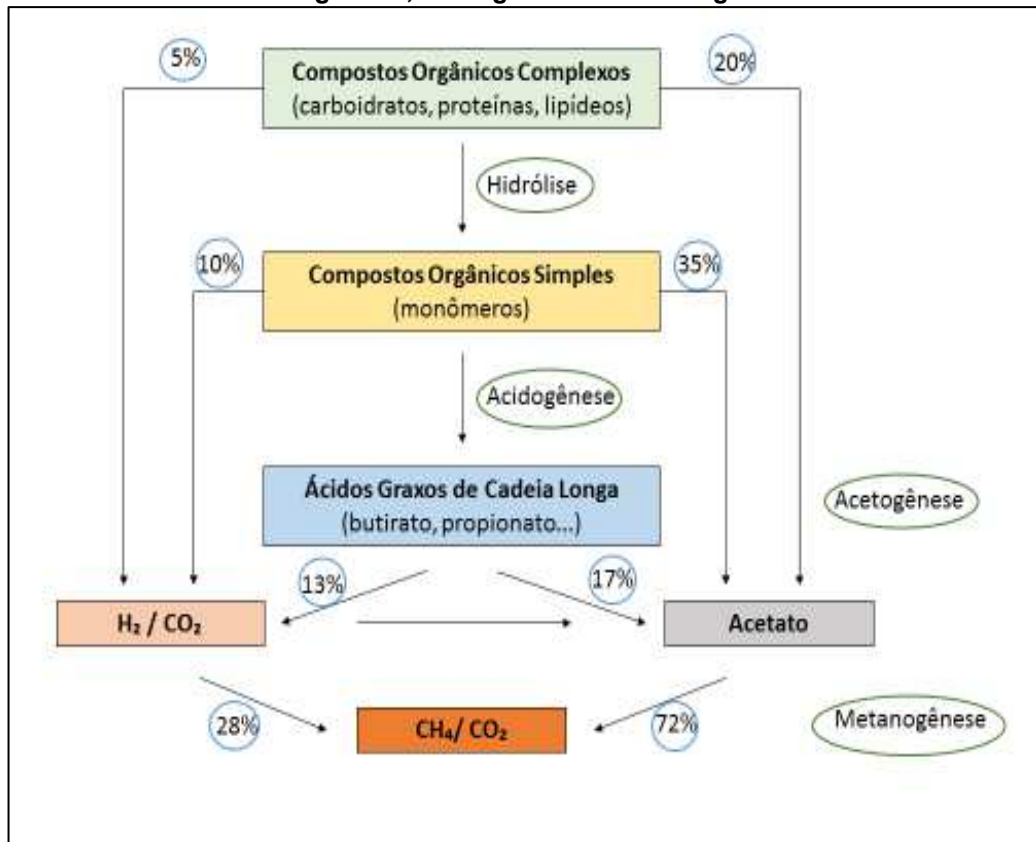
A Alemanha é líder na produção de biogás, gerando 3,7 milhões de toneladas por ano. Este biogás é utilizado como energia térmica, elétrica e biocombustível. No Canadá, há um crescente investimento em projetos de usinas de biogás, o que contribui para a economia e a geração de empregos a curto, médio e longo prazo. Além disso, o biogás é usado para abastecer veículos de coleta de resíduos sólidos (CEBULA et al., 2018).

No Brasil, a produção de biogás ocorre a partir de diversos resíduos orgânicos, como os resíduos agrícolas, animais, industriais e urbanos (FREITAS et al., 2019). Em outras palavras, há uma grande possibilidade de usar resíduos agroindustriais como biomassa para gerar energia (LOPES et al., 2020).

2.2.1 Processo anaeróbio

O processo de digestão anaeróbia ocorre em quatro fases distintas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 1).

Figura 1- Processo de digestão anaeróbia apresentado em quatro fases distintas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese



Fonte: Zaiat (2003)

Na primeira fase, conhecida como hidrólise, as substâncias complexas como os carboidratos, proteínas e lipídeos são transformadas em substâncias simples como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos, pelas bactérias hidrolíticas que por meio da liberação de enzimas e reações bioquímicas, decompõem esses substratos (ROHSTOFFE, 2010).

Em seguida, as bactérias fermentativas acidogênicas decompõem as substâncias mais simples em ácidos graxos voláteis como o ácido acético, propiônico e butírico, além de dióxido de carbono e hidrogênio, ácido láctico e álcoois (ROHSTOFFE, 2010).

Na etapa da acetogênese os microrganismos transformam os substratos da etapa anterior em gás hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂) e acetato. A última fase, metanogênese, ocorre a produção de CH₄ e CO₂ por meio das archaeas metanogênicas hidrogenotróficas e acetoclásticas (KOSTANESKI, 2018).

As hidrogenotróficas utilizam o H₂ e CO₂ para formação do CH₄. Enquanto as acetoclásticas utilizam o acetato como fonte de energia, gerando de 60 a 70% do CH₄ formado (KOSTANESKI, 2018).

O biogás é o resultado desse processo de digestão através da decomposição de matéria orgânica por meio da ação das bactérias e archaeas, composto por uma mistura de gases, principalmente pelo metano e dióxido de carbono. Verifica-se na Tabela 1 a composição em processo estável e a concentração dos gases presentes no biogás.

Tabela 1- Composição do biogás

Componente	Concentração
Metano (CH ₄)	50% - 75% em vol.
Dióxido de carbono (CO ₂)	25% - 45% em vol.
Água (H ₂ O)	2% - 7% em vol. (20 - 40 °C)
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	20 - 20.000 ppm
Nitrogênio (N ₂)	< 2% em vol.
Oxigênio (O ₂)	< 2% em vol.
Hidrogênio (H ₂)	< 1% em vol.

Fonte: Rohstoffe (2010)

2.2.1.1 Fatores que influenciam na digestão anaerobia

Para que seja eficiente a implantação de uma planta de biogás é preciso analisar fatores como o clima, tipo de solo, distância da fonte geradora de biogás, aspectos econômicos, sociais e ambientais no local de interesse. Além disso, é importante definir qual a finalidade do projeto a fim de compatibilizar a escala e a infraestrutura com os resultados esperados (CEBULA et al., 2018).

Fatores como a presença de oxigênio, temperatura, equilíbrio de pH, alcalinidade, disponibilidade de nutrientes, metais residuais e tempo de retenção no biodigestor têm uma influência significativa no processo de digestão anaeróbia e, conseqüentemente, na produção de biogás. Por isso, é fundamental monitorá-los com cuidado para garantir a eficiência e qualidade da geração de biogás, tanto em quantidade quanto em qualidade.

2.2.1.1.1 *Oxigênio*

Os microrganismos anaeróbios sobrevivem sem a presença de oxigênio, para algumas espécies uma pequena quantidade desse gás pode inibir os processos biológicos metabólicos (ROHSTOFFE, 2010).

As bactérias anaeróbias facultativas sobrevivem em ambientes com a presença de oxigênio ou sem; e as bactérias anaeróbias vivem em ambientes sem a presença de oxigênio (ROHSTOFFE, 2010).

2.2.1.1.2 Temperatura

A temperatura em níveis abaixo ou acima da faixa ideal inibe o desenvolvimento dos microrganismos importantes na digestão anaeróbia, prejudicando a eficiência do processo.

Segundo Chernicharo (1997) as arqueas metanogênicas se desenvolvem melhor em temperaturas próximas a 35°C, compreendendo a faixa mesofílica, de 30 a 35°C.

É possível utilizar culturas termofílicas, em que a faixa de temperatura varia de 50 a 60°C, aumentando a taxa de decomposição e diminuindo a viscosidade do substrato, em contrapartida, é necessário um gasto elevado de energia no processo, além da suscetibilidade a distúrbios e variações na quantidade de substrato no biodigestor (ROHSTOFFE, 2010).

2.2.1.1.3 pH

Manter o controle do pH para o desenvolvimento dos microrganismos de acordo com sua faixa ideal, permite o seu desenvolvimento máximo no processo de digestão.

Assim, as arqueas acidogênicas se desenvolvem melhor em pH ácido, acima de 5,0, enquanto as metanogênicas preferem o pH neutro de 6,8 a 7,2, não ocorrendo um desenvolvimento/crescimento em pH inferior a 6,2 (KOSTANESKI, 2018).

2.2.1.1.4 Alcalinidade

O processo de digestão de substratos gera ácidos voláteis, por isso é importante manter a alcalinidade do sistema para neutralizar o pH caso haja acúmulo de ácidos voláteis.

A concentração da alcalinidade requisitada no processo depende de alguns fatores como: alcalinidade gerada pelos resíduos; a necessidade de adquirir alcalinidade (cal, amônia, bicarbonato de sódio e carbonato de sódio); a concentração orgânica; o grau de controle do processo; a disponibilidade de reciclagem de água residuária; a taxa de conversão dos substratos para ácidos voláteis (SPEECE, 1985).

2.2.1.1.5 Nutrientes

Para o crescimento e desenvolvimento dos microrganismos, é necessário disponibilizar diferentes tipos de micro e macro nutrientes, nas quantidades necessárias, a fim de obter uma produção de metano ótima (ROHSTOFFE, 2010).

Segundo Gerardi (2003), o carbono, nitrogênio e fósforo são os nutrientes mais importantes no processo de digestão anaeróbia, juntamente com os elementos minerais como enxofre, ferro, potássio, sódio, cálcio e magnésio, fornecidos principalmente pela hidrólise dos carboidratos, das proteínas e dos lipídios (PARK, 2012).

O carbono é a principal fonte de alimentação dos microrganismos, enquanto o nitrogênio é responsável pela síntese de proteínas dos organismos, uma relação adequada para o desenvolvimento dos microrganismos está contida na faixa de 20 a 30 (VERNA, 2002).

Em condições de excesso de nitrogênio, ocorre acúmulo no meio na forma de amônia (NH_3), inibindo o crescimento das metanogênicas. Por outro lado, em condições de limitação da disponibilidade de nitrogênio, os microrganismos não conseguem metabolizar o carbono presente, o que leva a uma ineficiência do processo (SGORLON et al., 2011).

O tipo de matéria prima (milho, cana-de-açúcar, aguapé, algas, águas residuais) requer atenção em relação às exigências nutricionais necessárias para que o processo de digestão anaeróbia ocorra de forma eficiente. As águas residuais necessitam de maiores quantidades de nitrogênio, fósforo e enxofre do que águas residuais de ácidos graxos devido ao aumento da síntese das bactérias fermentativas, impactando nas matérias-primas deficientes em nitrogênio (SPEECE, 1985).

As arqueas metanogênicas necessitam de cobalto (Co), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e selênio (Se) (ROHSTOFFE, 2010). De acordo com Chernicharo (1997), os macronutrientes importantes para o crescimento microbiano são o

nitrogênio (N) e o fósforo (P); os micronutrientes principais são: potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), sódio (Na), cloro (Cl); e os micronutrientes secundários são: zinco (Zn), manganês (Mn), molibdênio (Mo), selênio (Se), cobalto (Co), cobre (Cu), níquel (Ni), vanádio (V) e tungstênio (W).

A necessidade de sulfato para as arqueas metanogênicas necessita ser melhor estudada, pois por um lado essa substância pode inibir a metanogênese, e por outro as arqueas metanogênicas precisam da produção de sulfeto para o seu desenvolvimento (SPEECE, 1985).

2.2.1.1.6 Metais residuais

O níquel é um micronutriente geralmente não essencial para o crescimento bacteriano, no entanto, para as arqueas metanogênicas, é um componente essencial da urease bacteriana e de enzimas bacterianas que convertem $H_2 - CO_2$ para acetato (SPEECE, 1985).

Há alguns outros metais residuais importantes no processo de digestão anaeróbia, como: ferro, cobalto, molibdênio, selênio e tungstênio (SPEECE, 1985).

2.2.1.1.7 Idade do lodo

É importante que o tempo de retenção celular (idade do lodo) seja compatível com o tempo de decomposição do substrato, caso a idade do lodo seja inferior a capacidade de decomposição, o rendimento da geração de biogás será relativamente baixo (ROHSTOFFE, 2010).

O trabalho de Orrico Júnior, Orrico e Júnior (2010) relaciona a alimentação concentrada em 40 e 60% e o tempo de retenção hidráulica de 30, 60, 90 e 120 dias sob a biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos. Para o tempo de retenção de 120 dias alcançou os melhores resultados na redução de SV e ST, com 63,42% e 61,25% respectivamente para a concentração de 40%. E em relação a geração de biogás, o tempo de retenção de 90 e 120 dias apresentaram resultados semelhantes.

Xavier e Júnior (2010) em seu estudo acerca dos parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo, consideraram que as reduções de SV e os potenciais de produção de biogás dos tratamentos com inóculo, em 75 dias, foram próximos àqueles alcançados sem uso de inóculo, em 150 dias. E recomendaram a

adição de 40% de inóculo (v/v) permitindo maiores produções de biogás (0,07 m³ por kg de dejetos) e tempos de retenção hidráulica de até 45 dias.

A seguir, a tabela 2 apresenta alguns requisitos importantes e suas respectivas faixas ideais, para que o processo de digestão anaeróbia ocorra com eficiência, como por exemplo: temperatura, pH, relação C/N, concentração da matéria seca, potencial redox, relação de C:N:P:S necessária e elementos traços.

Tabela 2- Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos

Parâmetros	Hidrólise/Acidogênese	Metanogênese
Temperatura (°C)	25 - 35	32 - 42
pH	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
Relação C:N	10 - 45	20-30
Concentração matéria seca (%)	< 40	< 30
Potencial Redox (mV)	+ 400 até - 300	< - 200
Relação de C:N:P:S necessária	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
Elementos traços	-	Essencial: Ni, Co, Mo, Se

Fonte: Endler (2021)

2.3 Fontes de biogás

No mundo, as principais plantas de biogás são geridas por sistemas que utilizam resíduos sólidos urbanos, seguido por dejetos agrícolas e pela reutilização de águas residuais (VIANCELLI; MICHELON; ELMAHDY, 2019).

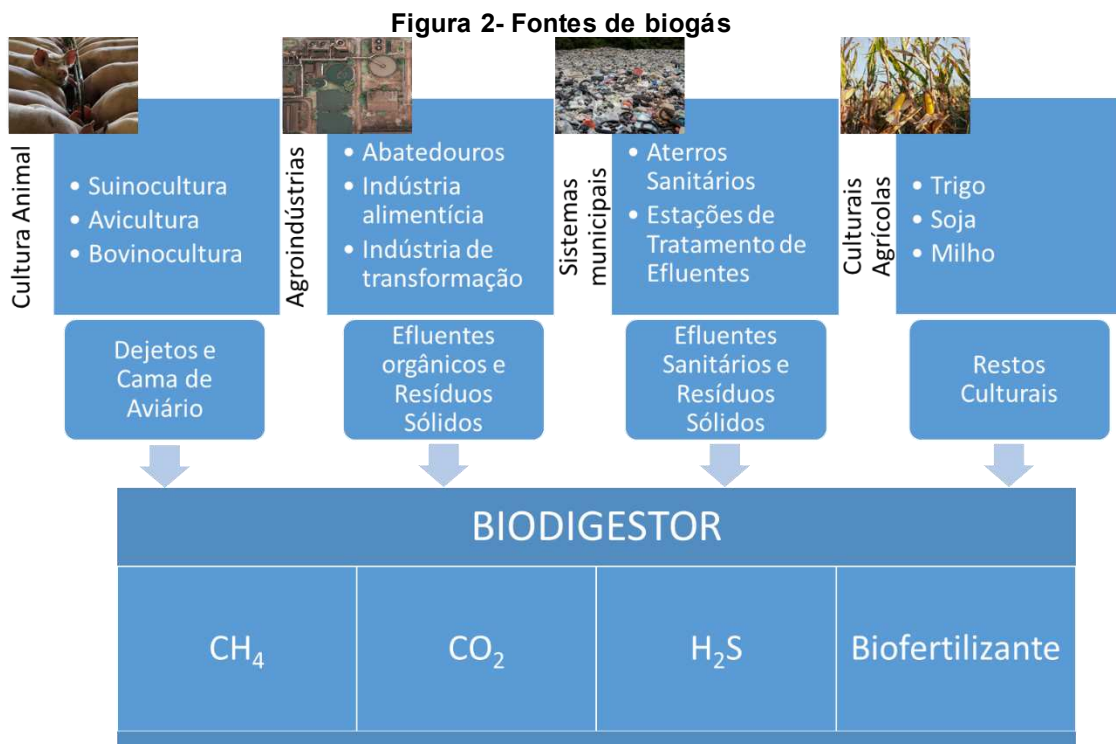
O biogás pode ser gerado em estações de tratamento de águas residuárias, aterros sanitários, indústrias de alimentos e bebidas, e também a partir de resíduos animais. Pode ser utilizado como fonte de energia renovável, trazendo inúmeros benefícios, econômicos, sociais e ambientais. Os resíduos agroindustriais possuem grande potencial para serem utilizados na geração de biogás devido a sua carga orgânica ser relativamente alta (BAHRS, ANGENENDT, 2019).

Na África, o biogás provém de fontes agrícolas, esterco animal, resíduos de usinas de açúcar, granjas e fazendas de leite (VIANCELLI; MICHELON; ELMAHDY, 2019).

Assim, a possibilidade de geração de energia renovável a partir de um substrato natural que pode ser obtido de diversas fontes disponíveis no país, contribui

para a segurança e descentralização energética, além de adequar às necessidades e objetivos de diferentes setores presentes na sociedade, desde agrícolas até industriais (BANJA et al., 2019).

Verifica-se na Figura 2 diversas atividades agrícolas, animais e industriais que geram resíduos orgânicos como subprodutos, os quais através do processo de digestão anaeróbia produzem biogás, podendo ser utilizados para aproveitamento energético e como fertilizantes.



Fonte: Autoria própria (2021)

2.3.1 Resíduos animais

O Brasil é um grande produtor agrícola, sendo destacada a criação em extensas áreas agrícolas e agroindústrias e exportação de carne de aves, suínos, bovinos. O processo de criação e o processamento da carne geram grandes quantidades de resíduos sólidos e líquidos, os quais devem ser tratados e destinados corretamente a fim de evitar a degradação do meio ambiente e contaminação do produto final a ser comercializado (PASQUAL; BOLLMANN; SCOTT, 2017).

Os resíduos sólidos e líquidos gerados do setor agroindustrial apresentam alta concentração de matéria orgânica e se descartados sem tratamento preliminar,

podem ocasionar problemas ambientais, como a contaminação das águas e do solo. O processo de digestão anaeróbia permite degradar esses compostos mitigando os impactos potenciais que podem causar danos à saúde humana e animal (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018).

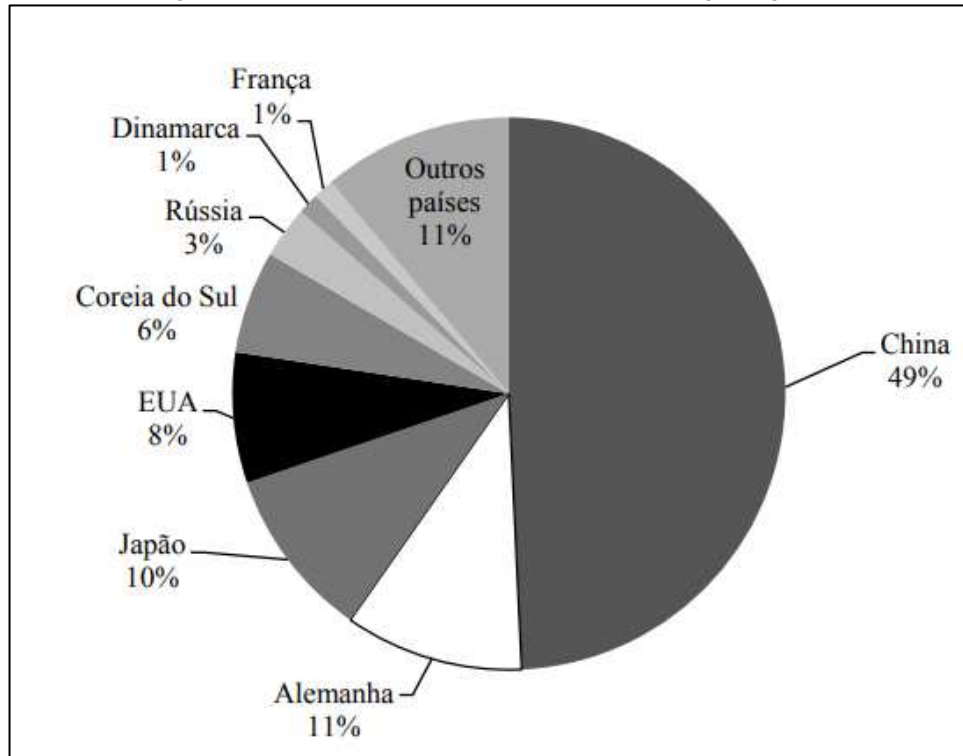
De acordo com Bharathiraja et al. (2016) a utilização dos resíduos animais na digestão anaeróbia é significativa, devido a característica da sua composição, sendo 75-92% de umidade e 72-93% de sólidos voláteis (SV) do sólidos totais (ST).

Assim, o uso de biodigestores como forma de tratamento de águas residuárias permite que o biogás pode ser aplicado na geração de energia, como energia térmica, elétrica e biocombustível. Após o tratamento, o biofertilizante gerado pode ser destinado a fertilização das áreas agrícolas, reduzindo o uso de fertilizantes químicos (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018).

O biogás produzido pode ser utilizado para geração de eletricidade nas próprias fazendas a partir de moto-geradores, e geração de energia térmica para secagem de grãos e produção de alimento. O excedente de biogás produzido pode ser injetado nas redes de distribuição de gás natural ou armazenado em sistemas de biodigestores com manta (MATHIAS; MATHIAS, 2015).

Segundo Grandó (2017), os resíduos animais são uma importante matéria prima na geração do biogás, sendo cerca de 45% dos resíduos utilizados pelos países apresentados na Figura 3 provém de quadrúpedes (gado, cavalo, ovelha, bode e vaca), as aves (patos, gansos e galinhas) e suínos representam 8%.

Figura 3- Países que citam resíduos animais como insumo para produção de biogás



Fonte: Grando (2017)

Dentre os estados americanos, Califórnia, Arizona, Novo México e Carolina do Norte são os que apresentam as maiores quantidades de biogás produzido a partir de resíduos animais (PASQUAL; BOLLMANN; SCOTT, 2017).

A China domina as tecnologias de uso de biodigestores baseadas no manejo animal, principalmente suinocultura e pecuária. O governo incentiva a construção de plantas de biogás nas propriedades rurais de pequeno e grande porte, para abastecimento familiar e de terceiros (MATHIAS; MATHIAS, 2015). A China foi o país que mais utilizou resíduos animais na produção de biogás, representando 49% do total (GRANDO, 2017).

Na Alemanha existem leis de incentivo para instalação e operação de plantas de biogás. O número de usinas de biogás aumentou de 1.050 para 8.292 (GBA, 2018). A produção alemã de biogás contribui com cerca de 50% da produção total na União Europeia (SCARLAT, DALLEMAND, FAHL, 2018). Purkus et al. (2018) cita que o potencial de produção de energia elétrica anual a partir do biogás no país é de 40 TWh.

No Japão, o aumento de plantas de biogás esta associado a tentativa de substituição de uma parcela de energia originada de plantas nucleares para alternativas mais sustentáveis. Hokaido possui um potencial de produção de energia

elétrica a partir dos resíduos da bovinocultura de leite de 730 GWh/ano (SHIMAHATA, FARGHALI, FUJII, 2020).

Na Polônia, a região norte e oeste são as que possuem a maior concentração de biodigestores instalados em fazendas. O biogás é produzido a partir dos resíduos bovinos e é utilizado como fonte de energia para diversos fins, como alimentação de misturadores, iluminação, aquecimento e para a rede elétrica. O governo polonês tem incentivado a construção de novas plantas de biogás, simplificando processos burocráticos e reduzindo tarifas para os empreendedores (IGLIŃSKI; BUCZKOWSKI; CICHOSZ, 2015).

No Canadá, é crescente o investimento em projetos de construção de plantas de biogás, contribuindo para a economia do país e na geração de empregos a curto, médio e longo prazo (CEBULA et al., 2018).

No Brasil, a região Sul apresenta a maior produção de suínos e bovinos confinados, possuindo uma grande geração de biogás diária e um enorme potencial exploratório na matriz energética do país (MATHIAS; MATHIAS, 2015).

A partir do biogás gerado, é possível transformá-lo em energia elétrica que pode ser injetada no sistema de distribuição da concessionária estadual, gerando créditos à unidade geradora para ser consumida em até 36 meses (LEITÃO; SILVA, 2018).

2.4 Usos do biogas

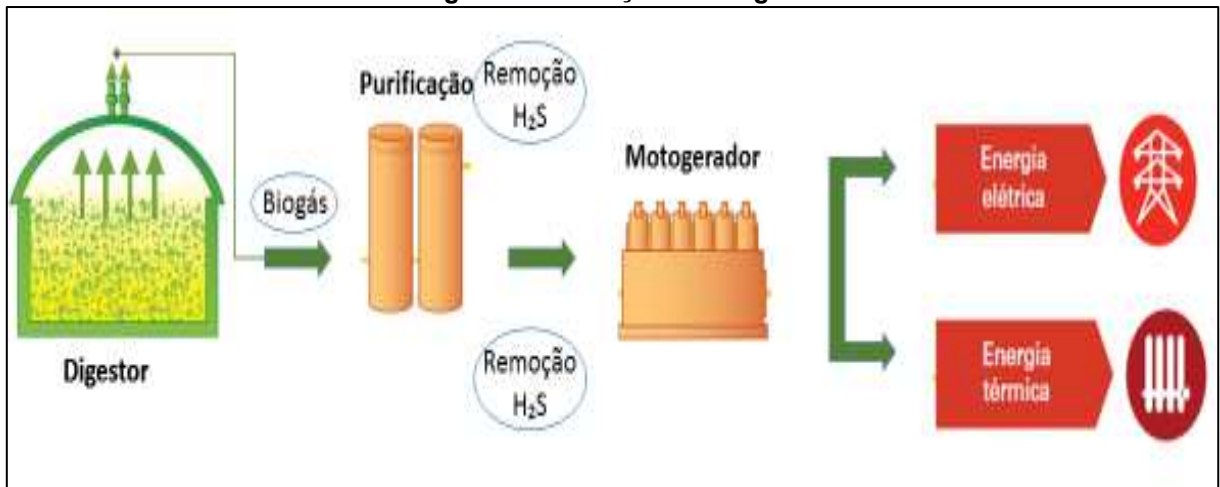
O biogás pode ser utilizado para produzir eletricidade através da conversão da energia química do gás em energia mecânica por meio da combustão, ativando um gerador que produz energia elétrica e/ou térmica (LIMA et al., 2017). Na Itália, o biogás produzido em todo o país é usado principalmente para geração de energia elétrica (DIMITROV; ZLATEVA, 2019).

A Alemanha é líder em termos de produção de biogás para uso como energia térmica, elétrica e de biocombustível. No Canadá, o biogás é utilizado para abastecimento de veículos de coleta (CEBULA et al., 2018).

No Brasil a biomassa representa 8,4% na matriz elétrica brasileira, sendo gerado cerca de 23 a 40 milhões de Nm³ de biogás ao dia produzidos pela agricultura, pecuária, resíduos industriais podendo ser utilizados na geração de energia elétrica, térmica e biocombustível para abastecimento veicular (BEN, 2020; DE OLIVEIRA; NEGRO, 2019).

Verifica-se na Figura 4 as possíveis utilizações do biogás para geração de energia térmica, elétrica e combustível veicular. Ao remover o dióxido de carbono é possível utilizá-lo como biometano para abastecimento veicular; a remoção do sulfeto de hidrogênio possibilita empregá-lo na forma de energia térmica para alimentação de caldeira, cocção e secagem de lodo em estações de tratamento de águas residuárias; e através de um moto gerador possibilita-se o uso na forma de energia elétrica podendo ser disponibilizado para geração distribuída.

Figura 4- Utilização do biogás



Fonte: Adaptado FEAM (2015)

Verifica-se no Quadro 1 de forma quantitativa a geração de energia elétrica a partir de resíduos industriais e agropecuários presentes no Brasil.

Quadro 1- Uso do biogás para geração de energia elétrica com uso próprio de cada setor e associado a Geração Distribuída

	Energia Elétrica		Referências Bibliográficas
	Setor	Geração	
Brasil	Álcool	626,33 TWh	BEN,2020
	Pecuária	16,33 TWh	PASQUAL; BOLLMANN; SCOTT, 2017
	Vinhaça	2,5 TWh	PEREIRA et al., 2020

Fonte: Autoria própria (2021)

2.4.1 Energia elétrica

Nos biodigestores, o biogás oriundo do processo anaeróbio pode ser canalizado até moto geradores, que a partir da combustão, convertem a energia química em mecânica, gerando eletricidade (LIMA et al., 2017).

Quando a energia elétrica produzida é excedente, pode ser vendida para a concessionária de energia local, contribuindo como fonte de renda extra ao produtor. Para isso, deve-se instalar um painel de controle a fim de medir a quantidade de energia gerada e enviada à rede de distribuição, além de possibilitar a interrupção caso necessário (BANJA et al., 2019).

A União Europeia é líder mundial em eletricidade a partir da geração de biogás, que provém principalmente de fontes agrícolas (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018). Chipre e Letônia fornecem subsídios financeiros para incentivar a geração de eletricidade a partir do biogás e a Lituânia simplificou os procedimentos administrativos para construção e instalação de plantas para geração de energia elétrica (BANJA et al., 2019).

No Brasil, a energia elétrica advinda dos resíduos gerados pela pecuária corresponde a 16.332 GWh/ano (PASQUAL; BOLLMANN; SCOTT, 2017). Para efeito comparativo, as indústrias de produção de álcool produziram 626.328 GWh/ano de energia elétrica no ano de 2019 (BEN,2020)

No estado do Paraná, a geração de energia elétrica a partir dos dejetos avícolas são de 53 GWh/ano empregados na geração distribuída e 1.172 GWh/ano para consumo próprio dos produtores rurais. Os dejetos da suinocultura geram 91 GWh/ano para geração distribuída e 478 GWh/ano para consumo das unidades geradoras (PESSOA; COLLA; COSTA, 2021).

2.4.2 Energia térmica

O biogás pode ser utilizado para gerar energia térmica, através da sua queima direta por meio de aquecedores, fogões, esquentadores ou caldeiras. Nas indústrias, ocorre a geração de biogás nas suas estações de tratamento de águas residuárias, o qual pode ser utilizado no processo industrial, devido ao seu poder calorífico, ou seja, no processo de combustão são liberadas grandes quantidades de calor, podendo diminuir a queima da lenha em caldeiras (DAVIES; STULP, 2016).

Na União Europeia, o biogás é muito utilizado para geração de energia térmica, cerca de 50% do consumo total de biogás na Europa é usado para a produção de calor. Os países de baixa renda utilizam também o biogás em pequena escala como gás de cozinha e para iluminação (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018).

2.4.3 Biocombustível

O biogás pode ser purificado, retirando-se o gás carbônico, gás sulfídrico, vapor de água e outras impurezas, dando origem ao biometano (CH_4), com qualidade equivalente ao gás natural e por meio da combustão interna nos motores, é transformado em energia (PTAK et al., 2017).

No mundo há mais de 17 milhões de veículos movidos por biogás purificado, e é crescente a demanda pelo seu uso, pois os usuários vêm se preocupando cada vez mais com as questões econômicas e ecológicas (PTAK et al., 2017).

No Brasil, a dificuldade em implementar o uso do biogás nos veículos automotores é devido à falta de infraestrutura e a necessidade de equipamentos e sistemas adicionais que não são disponíveis em veículos produzidos em massa, encarecendo o produto final e dificultando sua disseminação (DIMITROV; ZLATEVA, 2019).

De acordo com Gomes e Piacenti (2016), no estado do Paraná a cidade de Toledo apresenta viabilidade na implantação de biometano no abastecimento veicular a partir de dejetos animais. O município é um grande produtor agropecuário, gerando cerca de 69,5 milhões de toneladas de dejetos ao ano, apresentando alto potencial de geração de energia a partir do biogás (GOMES; PIACENTI, 2016).

Além disso, a utilização do biometano permite a substituição dos combustíveis fósseis por um combustível renovável e de baixo impacto ambiental, além de alimentar

a frota de produtores rurais e caminhões da prefeitura, reduzindo gastos com outros combustíveis (GOMES; PIACENTI, 2016).

2.5 Gases de efeito estufa (GEE)

A produção pecuária contribui com cerca de 10 a 30% na emissão de gases de efeito estufa geradas pelas atividades antrópicas. Os principais gases produzidos são o vapor d'água, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e amônia (NH_3) (TAVARES, 2016).

O dióxido de carbono é gerado através da respiração e degradação da matéria orgânica que é gerado a partir da hidrólise da ureia em amônia e CO_2 ; fermentação anaeróbia, sendo a responsável pela maior emissão de CO_2 e degradação aeróbia da matéria orgânica.

A produção de metano provém da fermentação entérica no trato digestivo dos animais e a partir da degradação da matéria orgânica proveniente dos dejetos através da ação microbiana. Na produção de bovinos, 85 a 90% do metano produzido provém da fermentação entérica (EBPA, 2012).

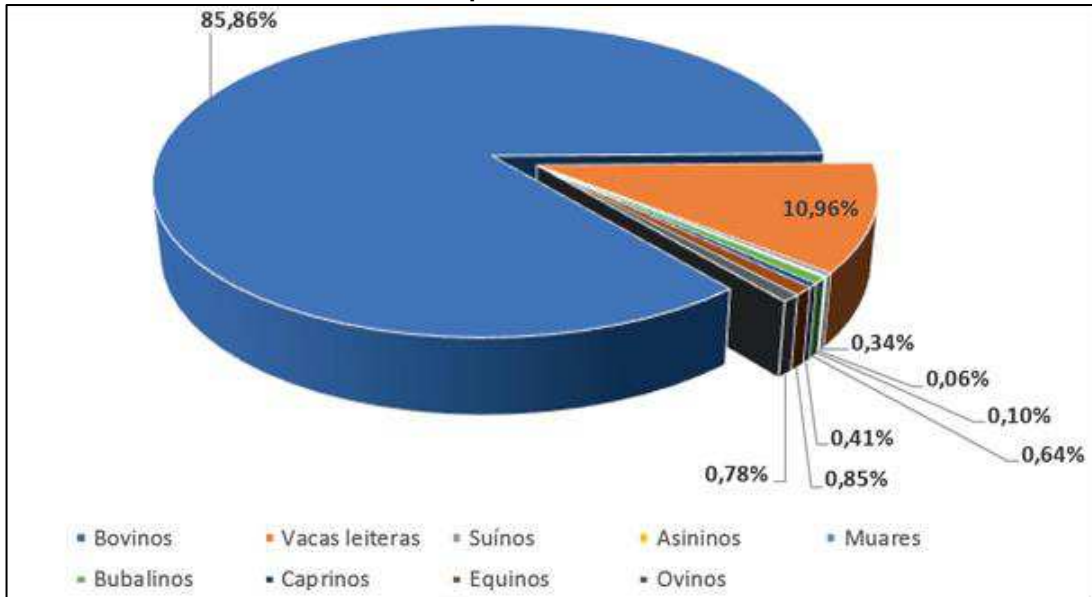
Na atmosfera o CH_4 possui capacidade de aquecimento 21 vezes maior que o CO_2 , contribuindo para as consequências negativas das mudanças climáticas (IPCC, 2019).

Outro gás de efeito estufa é o óxido nitroso, produzido por processos de desnitrificação, realizados pelas bactérias que utilizam carbono da matéria orgânica, em meio anaeróbico, e óxidos de nitrogênio, produzindo N_2O , NO e N_2 (TAVARES, 2016). No Brasil, as emissões do N_2O ocorrem através dos dejetos de animais em pastagens e aplicação de fertilizantes agrícolas (PERGHER et al., 2013).

As emissões de amônia ocorrem através da excreção dos animais, no caso a urina, assim o NH_3 têm origem na mineralização do nitrogênio que sofre alterações químicas. É um poluente atmosférico que contribui para o acúmulo de material particulado fino, tendo influência na eutrofização e acidificação (TAVARES, 2016).

No Brasil, a fermentação entérica é uma das principais fontes emissão de CH_4 (Figura 5), contribuindo com 19,0% do total de emissões nacionais e 56,5% do total de emissões do setor, sendo cerca de 97% proveniente de bovinos (86% dos bovinos de corte e 11% das vacas leiteiras).

Figura 5- Emissões em porcentagem de CH₄ pela fermentação entérica para diferentes espécies animais



Fonte: BRASIL (2019)

A seguir a Tabela 3 refere-se às emissões de gases de efeito estufa por setor no ano de 2019 e 2020. Os dados foram retirados da Análise de Emissões Brasileiras de GEE.

Tabela 3- Emissões de GEE no Brasil (tCO₂)

SETORES	2019	%	2020	%	VARIAÇÃO 2019-2020
Agropecuária	562.987.702	29%	577.022.998	27%	2,5%
Energia	412.466.747	21%	393.705.260	18%	-4,5%
Processos Industriais	99.472.616	5%	99.964.389	5%	0,5%
Resíduos	90.399.714	5%	92.047.812	4%	1,8%
Mudança de Uso da Terra e Floresta	806.996.124	41%	997.923.296	46%	23,7%
Total Emissões Brutas	1.972.322.903		2.160.663.755		9,5%
Total Emissões Líquidas	1.336.613.309		1.524.954.161		14,1%

Fonte: SEEG (2021)

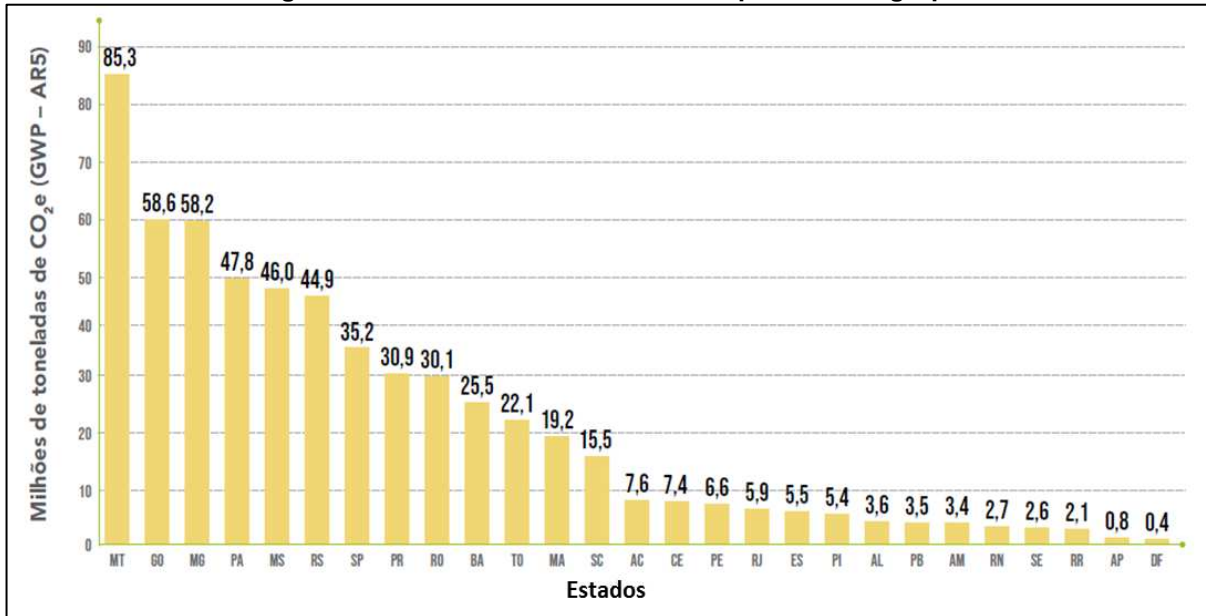
Em 2020, as emissões do setor agropecuário totalizaram 577 milhões de ton CO₂ eq., o subsetor que maior contribuiu com as emissões foi a fermentação entérica, apresentando uma emissão de 373 MtCO₂ eq., ou seja, 65% das emissões diretas da agropecuária (SEEG, 2021).

De acordo com o ranking das emissões estaduais do setor agropecuário (Gráfico 2), o estado do Mato Grosso foi o maior contribuinte, emitindo cerca de 85,3

milhões de ton de CO₂ eq. no ano de 2020. E o Distrito Federal o menor emissor com 0,4 milhões de ton de CO₂ eq. (SEEG, 2021).

Em seguida, os estados de Goiás e Minas Gerais praticamente com as mesmas emissões 58,6 e 58,2 milhões de ton CO₂ eq., juntamente com o estado do Mato Grosso correspondem a 35% das emissões nacionais.

Gráfico 2- Ranking das emissões estaduais de CO₂ eq. do setor agropecuário em 2020



Fonte: SEEG (2021)

3 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho consistiu em realizar uma revisão sistemática de forma criteriosa e planejada, afim de coletar e selecionar dados de estudos relevantes de sistemas reais na cadeia agropecuária da suinocultura, bovinocultura, avicultura; acerca do potencial energético a partir da produção de biogás originada pela biomassa (dejetos e águas residuárias orgânicas) e estimar os GEE destas atividades.

3.1 Sistema de busca e base de artigos científicos

A metodologia utilizada no presente estudo foi realizada de forma sistêmica a partir de artigos e trabalhos científicos com fonte principal na base de pesquisa do PERIÓDICOS CAPES com complemento na base do GOOGLE ACADÊMICO. A plataforma de pesquisa Periódicos Capes abrange bases científicas de artigos, como por exemplo: Scielo, Science Direct e Scopus.

Os artigos utilizados para o desenvolvimento da dissertação foram aproveitados segundo os critérios:

- a. Dados de produção de biogás em sistemas reais;
- b. Caracterização físico-química de águas residuárias;
- c. Caracterização do biogás.

O desenvolvimento do método de procura de informações foi realizado com a ferramenta de busca avançada, com data de publicação inicial e preferencial a partir de 2017, abrangendo o idioma inglês, incluindo trabalhos internacionais. O filtro de busca utilizou a janela “títulos” com descritores específicos.

3.1.1 Descritores suínos

O desenvolvimento da pesquisa foi realizado nas bases de busca do Periódicos Capes com os descritores: BIOGAS AND SWINE, BIOGAS AND ENERGY AND SWINE, BIODIGESTER AND SWINE.

O descritor BIOGAS AND SWINE retornou 182 artigos científicos, enquanto BIOGAS AND ENERGY AND SWINE apenas 25 e BIODIGESTER AND SWINE, 17 artigos. Não foi necessário realizar buscas no Google acadêmico, pois os dados coletados no Periódicos Capes foram suficientes.

3.1.2 Descritores bovinos

Na base de dados Periódicos Capes foram utilizados os seguintes descritores e respectivamente entre parênteses apresenta o números de artigos retornados: BIOGAS AND BOVINE (17), BIOGAS AND COW (138), BIOGAS AND DAIRY CATTLE (19), BIODIGESTER AND BOVINE (2), BIODIGESTER AND COW (4), BIOGAS AND ENERGY AND BOVINE (3), BIOGAS AND ENERGY AND COW (29), WASTEWATER AND COW (36), WASTEWATER AND DAIRY CATTLE (24).

No Google acadêmico utilizou-se a busca CATTLE AND BIOGAS AND VOLATILE SOLIDS AND DAIRY, durante o ano de 2018 até 2022, apenas no idioma inglês, retornando 3.210 estudos científicos. No entanto, foram analisadas 25 páginas, totalizando 250 trabalhos.

3.1.3 Descritores de abatedouro de aves, suínos e bovinos

Na plataforma de pesquisa Periódicos Capes, utilizou-se o descritor BIOGAS AND SLAUGHTERHOUSE, retornando 68 artigos, contemplando os três tipos de abatedouro. No entanto, os dados coletados foram insuficientes para preencher as planilhas e para confecção de tabelas e mapas. Assim, foi necessária a realização de buscas no Google Acadêmico.

Durante a pesquisa na base de dados do Google Acadêmico, delimitou-se a busca para o período de 10 anos, ou seja, a partir do ano 2012. Em relação ao idioma optou-se pelo idioma português com o intuito de pesquisar teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso. O descritor utilizado que contemplava abatedouro de aves, suínos e bovinos foi ABATEDOURO, retornando 8.520 resultados. Cada página da plataforma apresentou 10 trabalhos, foram analisadas 35 páginas, totalizando 350 estudos científicos, priorizando teses e dissertações.

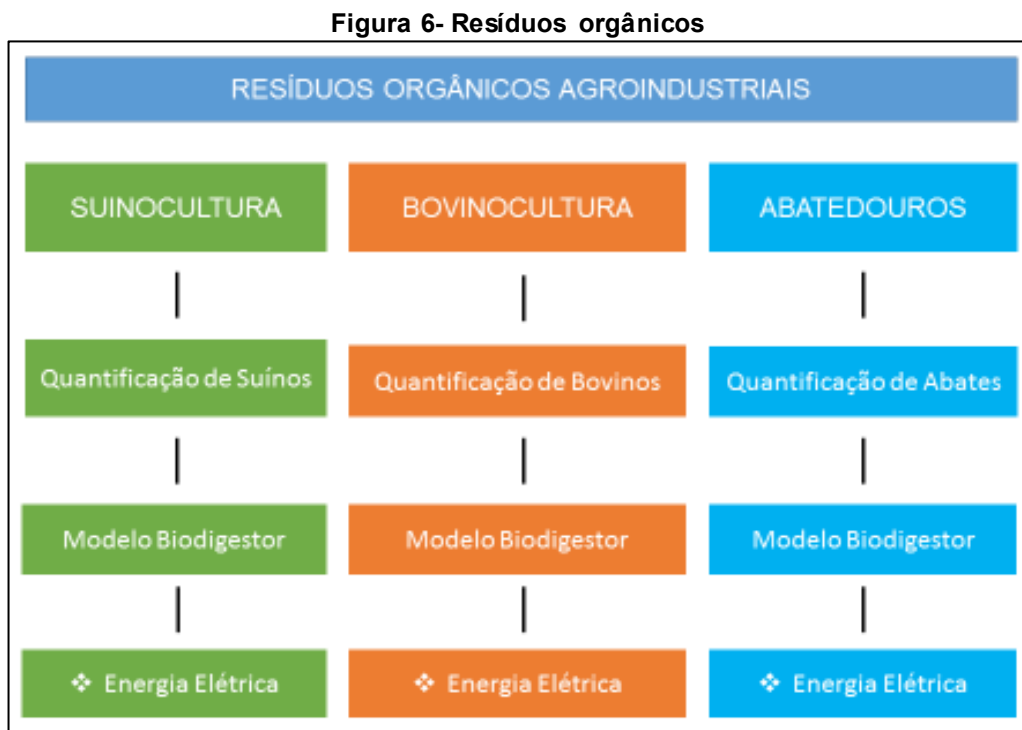
Ao longo das buscas e leituras, foram separados os trabalhos para cada tipo de abatedouro: aves, suínos e bovinos. No entanto, ao final das buscas, os dados obtidos acerca dos abatedouros de suínos e bovinos foram insuficientes se analisados isoladamente, pois constatou-se que muitos abatedouros realizam o abate conjunto de suínos e bovinos. Deste modo optou-se por realizar a união dos dados de estudo de ambos.

Os artigos selecionados foram aqueles que contemplavam informações relevantes, como por exemplo: teor de sólidos voláteis, sólidos totais, geração de água

residuária por animal/dia e produção de metano; em sistemas reais de produção. Desta forma, para seleção dos artigos foram realizadas as leituras e análises dos títulos, resumos, metodologias e resultados visando a coleta de dados.

3.2 Estrutura da Pesquisa realizada na Cadeia agroindustrial da Suinocultura, Bovinocultura e Avicultura

O desenvolvimento deste tópico foi realizado a partir de etapas descritas na Figura 6, onde as fontes de biogás provenientes dos resíduos agroindustriais se dividem em suinocultura, bovinocultura e abatedouros.



Fonte: Autoria própria (2022)

Foram construídos planilhas e mapas a partir da quantificação das cabeças de suínos e bovinos leiteiros; abates de suínos, bovinos e aves por estado brasileiro. Os dados analisados foram coletados no banco de dados do IBGE e em trabalhos científicos:

- geração de águas residuárias;
- sólidos voláteis;
- produção de metano a partir do sólidos voláteis;
- produção potencial de energia;
- geração de gases de efeito estufa.

3.3 Produção de Biogás da Cadeia agroindustrial da Suinocultura, Bovinocultura e Avicultura

Para o desenvolvimento do trabalho confeccionou-se uma planilha com dados levantados no item 3.1 a partir do cálculo da média de parâmetros, como:

- Sólidos voláteis (SV) (g/L);
- Variável de transformação de SV em metano (B_0) ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{Kg SV}$);
- Volume de água residuária (L/animal/dia).

Mediante a utilização do software Qgis 3.16.15 foram desenvolvidos 4 mapas para cada tipo de dejetos: suínos, bovinos, abatedouro de aves e abatedouro de suínos/bovinos, totalizando 16 mapas. Os mapas apresentam:

- I. a produção de biogás a partir da concentração de SV nas águas residuárias;
- II. o potencial de geração de energia por estado;
- III. a demanda e oferta de energia elétrica e
- IV. o abatimento de GEE.

Os mapas da produção de biogás a partir de dejetos de suínos e bovinos, bem como dos abatedouros foram criados com base em dados coletados em pesquisas bibliográficas sobre a quantidade destes animais por estado brasileiro e a produção de metano calculada a partir dos dejetos e águas residuárias gerados.

Assim, a estimativa da quantidade de biogás produzido diariamente por cabeça, bovinos e suínos, foi determinado pela equação 1 (Adaptado IPCC, 2019).

$$\text{CH}_4: \frac{\Sigma(N \times \text{SV} \times \text{AW} \times B_0)}{1000} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

CH_4 : Produção diária de metano (Nm^3 metano)

N: número de animais no país ou estado (número inteiro)

SV: concentração de Sólidos voláteis nas águas residuárias geradas (g SV/L)

B_0 : Capacidade máxima teórica de produção de metano por dejetos produzido ($\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{KgSV}$)

AW: águas residuárias geradas anualmente por uma unidade de conjunto de animais (L/animal)

1000: conversão de gSV para KgSV

3.4 Energia Potencial da Cadeia agroindustrial da Suinocultura, Bovinocultura e Avicultura

Os gases gerados, podem ser transformados em energia elétrica, sendo possível estimar a sua geração através do fator de conversão do biogás em energia, de acordo com os tipos de resíduos.

3.4.1 Energia elétrica

A energia elétrica (MWh) gerada a partir da produção de metano, foi calculada pela seguinte equação 2:

$$EE = \frac{\text{Metano SV} \times 1,8 \times 365}{0,65 \times 1000} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

EE: Energia elétrica (MWh)

Metano SV: metano a partir de sólidos voláteis (Nm³/d)

Coefficiente de 1,8: transformação do biogás para KWh (BRONDANI, 2010),

Coefficiente de 0,65: transformação do metano para biogás

Coefficiente de 1000: mudança de unidade de KWh em MWh

365: conversão para ano

O potencial de geração de energia em relação a demanda por estado foi calculado através da energia elétrica gerada anualmente (MWh) x demanda de consumo de energia (MWh), a qual foi obtida através de dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) referente ao ano de 2020.

3.5 Gases de Efeito Estufa (GEE)

As emissões de sistemas líquido e de lodos (águas residuárias) em sistemas de tratamento baseados em lagoas anaeróbias podem considerar desprezíveis relativos a formação de óxido nitroso (N₂O) de forma direta com base na ausência de formas oxidadas de nitrogênio nesses sistemas, combinados com o baixo potencial de nitrificação e desnitrificação no meio anaeróbio (IPCC, 2019). Por isso, o N₂O foi desconsiderado nas análises e cálculos realizados.

Os dados referentes aos gases de efeito estufa (ton eq.CO₂) foram obtidos pela consideração do metano ser 21 vezes mais impactante que o CO₂ para o

aquecimento global (IPCC, 2019). Desta forma, a equação 3 representa a minimização de GEEs por meio do aproveitamento energético do CH₄.

$$GEE = \frac{0,667 \times \text{Metano SV} \times 365 \times 21}{1000} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

GEE: Gás de efeito estufa (ton CO₂ eq/ano);

Metano SV: metano a partir de sólidos voláteis (Nm³/d);

21: conversão do CH₄ em CO₂ equivalente;

0,667: transformação do Nm³ de metano para Kg.eq CO₂;

1000: transformação de Kg em ton

365: conversão para ano

3.6 Área Florestal

Realizou-se a conversão dos GEE (ton eq.CO₂) gerados na cadeia agroindustrial estudada em área verde, ou seja, faz-se necessário quantificar um número suficiente de árvores que compensem as emissões de GEE, retirando CO₂ da atmosfera (MANFRINATO; VIDAL; BRANCALION, 2018). A equação 4 representa a área verde em hectare.

$$\text{ÁREA VERDE} = \frac{GEE}{3,7 \times EB} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

GEE: Gás de efeito estufa (ton CO₂ eq)

3,7: coeficiente de transformação de ton CO₂eq sequestrado da atmosfera em ton. de Carbono Vegetal (MANFRINATO; VIDAL; BRANCALION, 2018)

EB: estoque de biomassa (ton. de carbono vegetal/ha)

$$\text{Carbono Vegetal} = \frac{GEE}{3,7} \quad (\text{Equação 5})$$

3.7 Estatística Descritiva

A estatística descritiva foi utilizada no trabalho como forma de descrever e resumir os dados coletados de uma amostra ou população a partir dos dados

levantados. Nesse contexto, algumas medidas de tendência central e de dispersão foram calculados para a análise dos dados.

A média foi utilizada a partir da determinação de teste de normalidade dos dados por Kolmogorov-Smirnov e/ou Shapiro-Wilk, sendo utilizada como uma medida de tendência central que representa o valor central dos dados. A média é muito utilizada para representar o comportamento geral dos dados, mas pode ser afetada por valores extremos (outliers).

O desvio padrão é uma medida de dispersão que indica o quanto os dados se afastam da média. Ele é obtido pela raiz quadrada da variância, que é a média dos quadrados das diferenças entre cada valor e a média. O desvio padrão é uma medida importante para avaliar a variabilidade dos dados, sendo que valores maiores indicam maior dispersão dos dados.

A mediana é outra medida de tendência central que representa o valor central dos dados, mas é menos sensível a valores extremos do que a média. Ela é obtida ordenando os dados em ordem crescente ou decrescente e selecionando o valor central. Se houver um número par de observações, a mediana é a média dos dois valores centrais.

O boxplot é uma representação gráfica que ilustra as medidas de tendência central e de dispersão dos dados. Ele é composto por uma caixa que representa o intervalo interquartil (IQR), que é a diferença entre o terceiro e o primeiro quartil dos dados. A mediana é representada por uma linha dentro da caixa, e os valores mínimos e máximos são representados por linhas (whiskers) que se estendem até os valores mais extremos, que não são considerados outliers. Outliers são representados como pontos fora dos whiskers.

Os Boxplots realizados a partir da mediana utilizaram os quartis Q1 e Q3 correspondentes a 25 % dos dados e a 75 % dos dados. As equações 6 a 9 explicam os outliers e valores extremos.

$$\text{outliers inferiores} < Q1 - 1,5 \times (Q3 - Q1) \quad (\text{equação 6})$$

$$\text{outliers superiores} > Q1 + 1,5 \times (Q3 - Q1) \quad (\text{equação 7})$$

$$\text{valores extremos} < Q1 + 3,0 \times (Q3 - Q1) \quad (\text{equação 8})$$

$$\text{valores extremos} > Q1 + 3,0 \times (Q3 - Q1) \quad (\text{equação 9})$$

Em resumo, a estatística descritiva utiliza a média, desvio padrão, mediana e boxplot para resumir e interpretar os dados de uma amostra ou população a partir da análise de tendências sobre as características dos dados e sua distribuição.

4 RESULTADOS

4.1 Suinocultura

4.1.1 Estatística descritiva da biomassa da suinocultura

A suinocultura é uma atividade agrícola que também pode ser uma fonte de energia renovável através da produção de biogás. O biogás é produzido a partir de degradação anaeróbia de resíduos orgânicos, como os excrementos de suínos. Além de ser uma fonte de energia limpa e renovável, a produção de biogás a partir da suinocultura também ajuda a reduzir os problemas ambientais relacionados aos resíduos orgânicos.

As principais variáveis que contribuem para a geração de biogás em sistemas de biodigestores estão relacionadas com o volume de águas residuárias geradas e com a taxa de transformação de carbono orgânico disponível para metano a partir da matéria orgânica disponível que pode ser representada indiretamente pelas variáveis DQO, DBO e SV. A tabela 4 apresenta valores destes parâmetros obtidos de literatura e suas variações de sistemas de tratamento por biodigestores reais.

Tabela 4- Análise descritiva para os parâmetros relacionados a geração de metano e biogás

Parâmetros	Amostra	Média	Valor mínimo	Valor máximo	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Água residuária (L/suíno/d)	5	6,26	4,500	7,30	1,13	18,12
$B_{o_{met}}$ (Nm ³ CH ₄ /Kg SV)	8	0,32	0,290	0,37	0,027	8,44
DBO (mg/L)	10	6275,80	862,00	15753,00	4977,84	79,32
DQO (mg/L)	10	14614,90	1507,00	30044,00	8697,43	59,51
$B_{o_{bio}}$ (Nm ³ Biogás/Kg SV)	7	0,48	0,35	0,78	0,137	28,45
SV (gSV/L)	13	41,09	9,81	80,35	24,78	60,31

Fonte: Autoria própria (2022)

Apenas a variável de transformação de sólidos voláteis para metano ($B_{o_{met}}$) apresentou um valor de coeficiente de variação considerado baixo, ou seja, menor que 15 % (PINTO & SILVA, 2020) com valor de 8,44%. Isto pode ser explicado pela fonte de pesquisa estar relacionada a biodigestores reais ou na forma de protótipos,

o que propiciou uma maior convergência na taxa de transformação de SV para metano.

Observou-se uma grande gama de valores em artigos científicos relativos à pesquisa de escala de bancada e associados a tratamentos com a cogeração de biogás, nos quais os valores de B_{met} tendem a ser maiores que o valor médio obtido (Silva et al., 2022; XIA et al., 2012). Hernández-Chover, Bellver-Domingo e Hernández-Sancho (2018) constataram que a escala de Estações de Tratamento de Efluentes tem relação direta com a eficiência e com a otimização de processos e sistemas de tratamento.

Os dados utilizados para obter o coeficiente de transformação de sólidos voláteis para metano e biogás provém de criações de suínos de ciclo completo, resultando em uma média de $0,32 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{KgSV}$ e $0,48 \text{ Nm}^3\text{biogás}/\text{KgSV}$, respectivamente. Pode-se observar que a relação entre o metano e o biogás ficou próxima de 66,7 %.

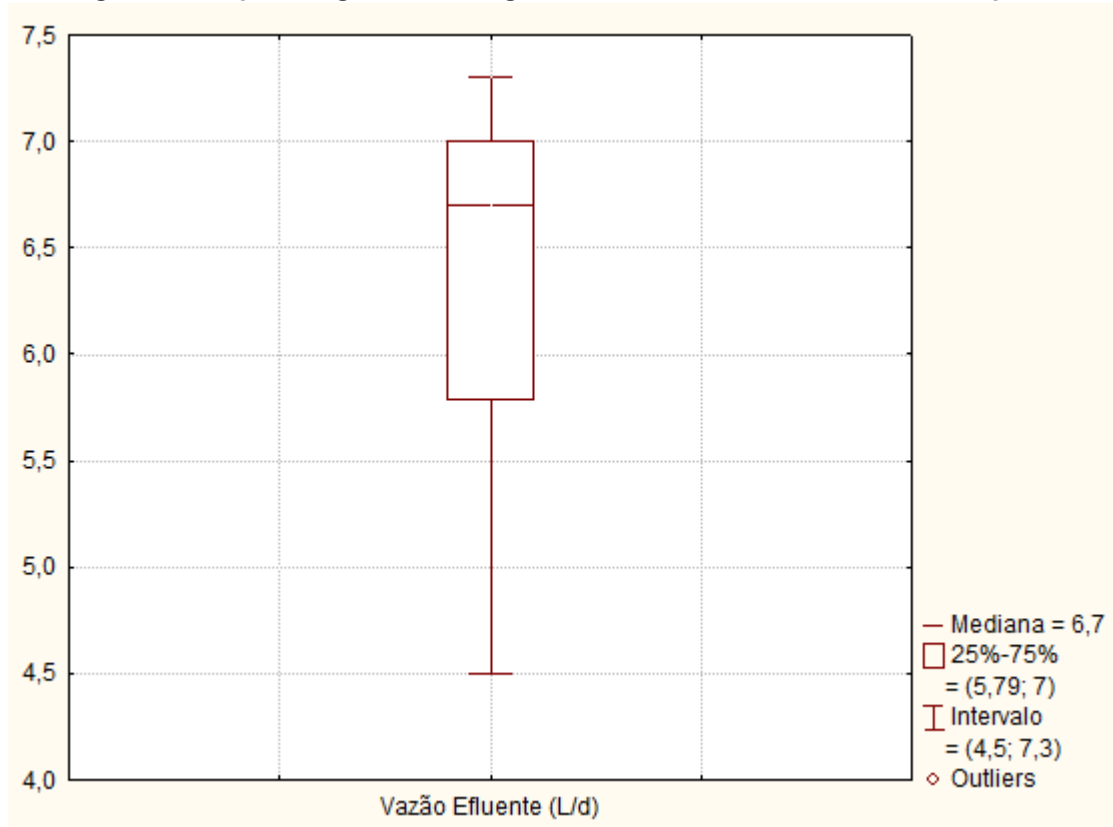
Os coeficientes de variação de transformação de SV em biogás e de geração do volume de água residuária apresentaram valores com média dispersão entre 15% e 30% (PINTO & SILVA, 2020), com valores de 28,45% e 18,12%, respectivamente.

A utilização da ferramenta Box-plot auxilia na avaliação da simetria dos dados, sua dispersão e a existência ou não de *outliers*, pois é um gráfico estatístico que possibilita representar a distribuição de um conjunto de dados com base em alguns parâmetros descritivos, permitindo a comparação de dois ou mais conjuntos de dados correspondentes às categorias de uma variável (CAPELA; CAPELA, 2011).

Além disso, a existência de *outliers*, valores extremamente altos ou extremamente baixos, pode indicar tanto dados incorretos como dados válidos que necessitam de uma atenção especial. Dependendo do objetivo pode ser que justamente os *outliers* sejam os pontos de interesse da análise (CAPELA; CAPELA, 2011).

Para o parâmetro geração de água residuária obteve-se uma média de 6,26 L/suíno com desvio padrão de 1,13 L/suíno. O valor mínimo obtido foi de 4,50 e o máximo de 7,30 L/suíno (vide Figura 7). Estudos realizados por Oliveira (1993) observaram que a quantidade de dejetos produzidos para ciclo completo foi de 7,0 L por suíno, sem considerar a lavagem ou desperdício de água.

Figura 7- Boxplot da geração de água residuária de suínos em ciclo completo



Fonte: Autoria própria (2022)

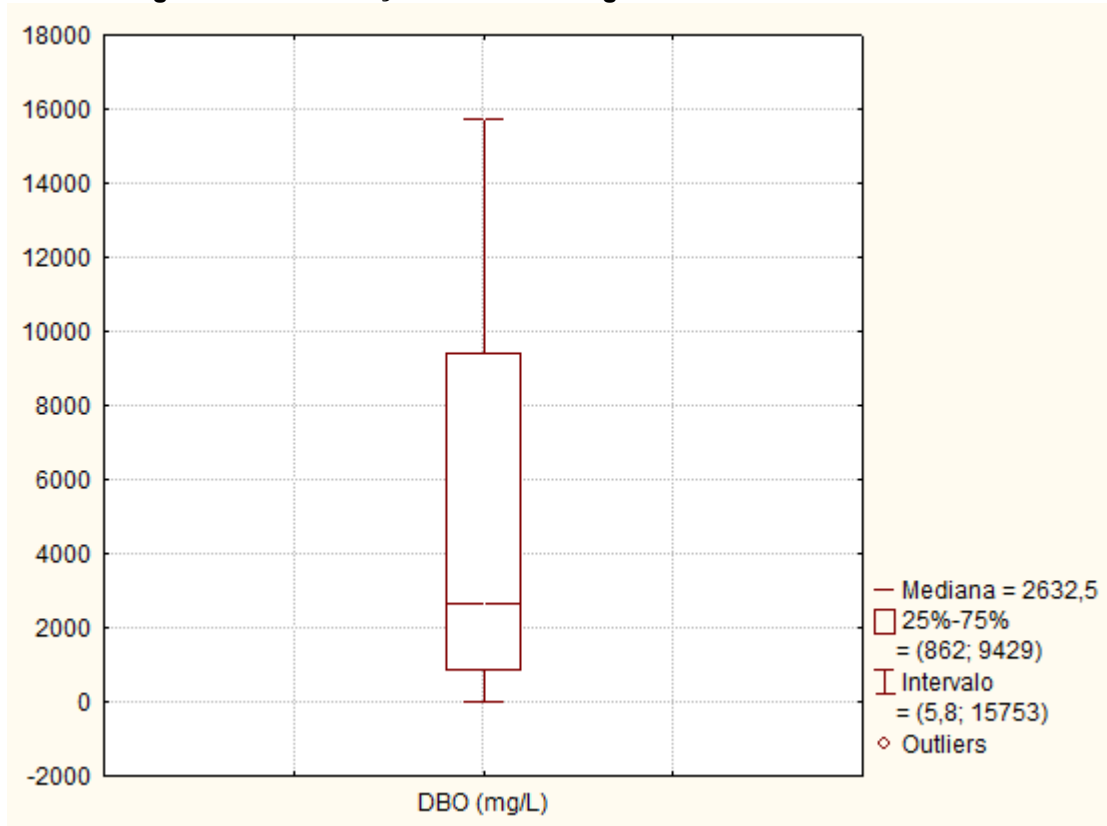
De acordo com o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov o valor D para a geração de águas residuárias foi de 0,2517 que é menor que o Dtab de 0,5633 para confiabilidade de 95%, o que confirma a distribuição normal. O teste de Shapiro- Wilk apresentou p valor de 0,419 superior a 0,05, ou seja, os dados coletados estão em normalidade.

A quantidade de água residuária produzida por suínos pode variar dependendo do tipo de limpeza das baias (raspagem e/ou lavagem das baias) e do desperdício de água na dessedentação dos suínos, ocasionando maior ou menor geração de água residuária. Outro fator que modificaria o volume de água residuária gerado seria a idade do suíno, já que na creche possui valores abaixo de 2,0 L/suíno (TAVARES, 2016; FEPAM, 2012). Porém, para este parâmetro considerou-se apenas a fase de terminação ou o ciclo completo.

As variáveis DBO, DQO e SV apresentaram os maiores coeficientes de variação com valores de 79,32, 59,51 e 60,31% respectivamente. A discrepância de dados ocorre devido às diferentes formas de lavagem das baias e alimentação dos suínos, que influenciam na carga orgânica e na concentração destas variáveis na

água residuária. Para a DBO e DQO foram obtidas médias de 6.275,80 mg/L e 14.614,90 mg/L, respectivamente (Figuras 8 e 9).

Figura 8- Concentração de DBO em água residuária de suinocultura

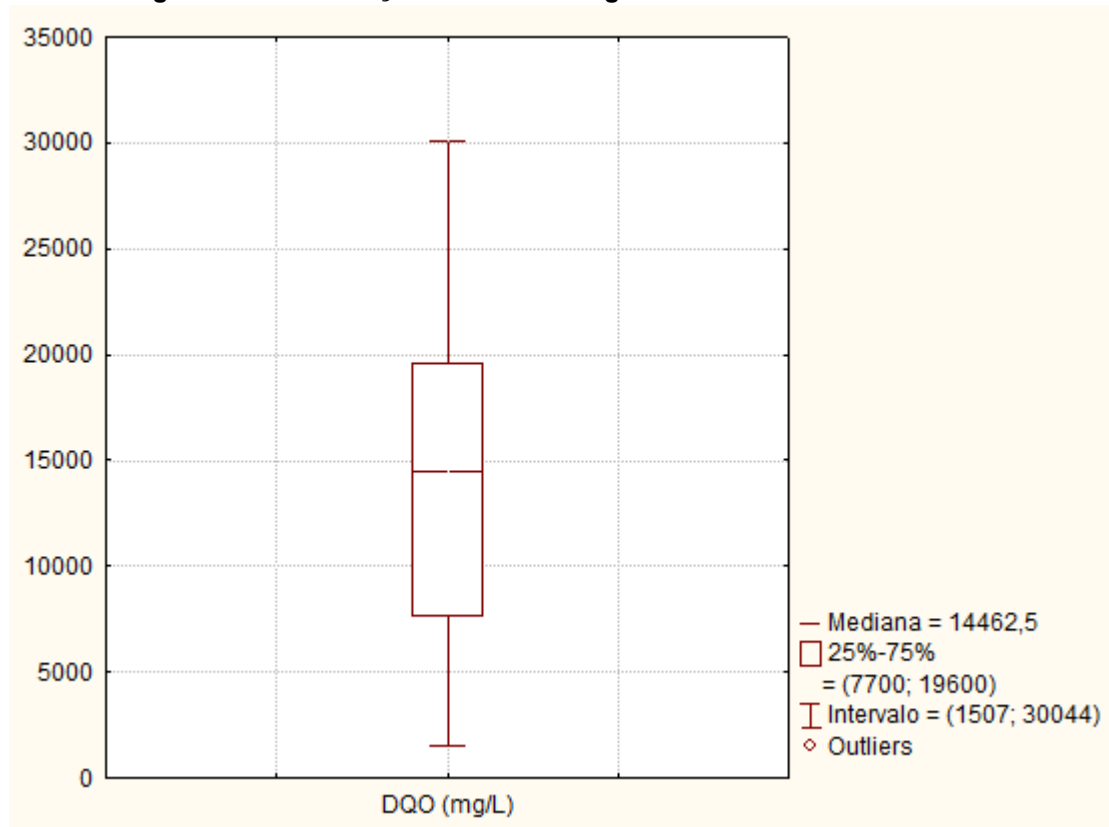


Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov o valor D para a DBO foi de 0,160 que é menor que D_{tab} de 0,4093 que corresponde a dados em normalidade com confiabilidade de 95%. O teste de Shapiro- Wilk obteve-se um p valor de 0,382, com o p valor superior a 0,05. Ou seja, os dados coletados estão em normalidade.

Na figura existe apenas um outlier, o que pode ser considerado normal para o parâmetro DBO e DQO (Figura 8), devido as suas variabilidades observadas com coeficiente de variação (CV) igual a 79,32 e 59,51 %, respectivamente. Assim, existe uma grande variabilidade na concentração da DBO e DQO devido a fatores como: o número de suínos, a fase de crescimento, o tipo de alimentação, a forma de limpeza das baias e o consumo de água de dessedentação nas granjas de suínos.

Figura 9- Concentração de DQO em água residuária de suinocultura



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov o D valor para a DQO foi de 0,4787 que é menor que o Dtab de 0,4890 que confirma a normalidade dos dados com confiabilidade de 95%. O teste de Shapiro-Wilk de 0,972 foi superior a 0,05. Ou seja, os dados coletados estão em normalidade.

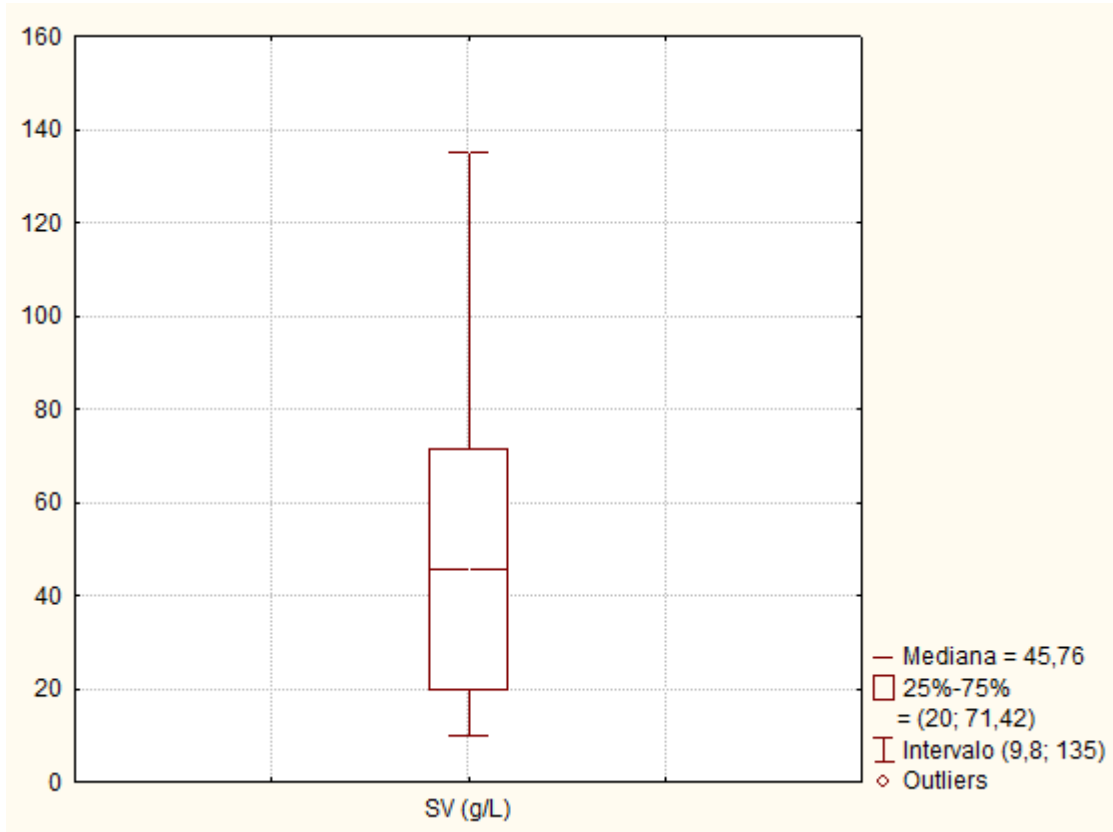
Nestes dados na análise de desvio padrão e média existem dois outliers, porém, devido a dispersão dos dados deste parâmetro, pode-se considerar este fator como normal.

Analisando a relação DBO/DQO, obteve-se o valor de 0,43, que está dentro da faixa de literatura de 0,3 a 0,8 recomendada para tratamento de água residuária por sistemas biológicos com tempo mais prolongado (ABDALLAA e HAMMAMB, 2014). Deng et al. (2014) destacam que esta água residuária possui uma grande carga de material biodegradável de rápida assimilação, o que propicia a aplicação de processos biológicos anaeróbios de tratamento.

A média de SV foi de 41,09 g SV.L⁻¹ com desvio padrão de 24,78 g SV.L⁻¹. Orhororo, Ebunilo e Sadjere (2017) destacam a importância dos SV como fator primordial para a geração de metano nos sistemas anaeróbios de biodigestão. Desta forma, de modo geral, quanto maior a concentração de SV, maior o potencial de

geração de biogás. A Figura 10 apresenta os valores de concentração de SV levantados em literatura.

Figura 10- Boxplot dos valores de concentração de sólidos voláteis em água residuária de suinocultura



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov o valor de D para os SV foi de 0,2422, com valor menor que D_{tab} de 0,3614 com confiabilidade de 95%. O teste de Shapiro-Wilk foi de 0,767 com p valor superior a 0,05. Ou seja, os dados analisados estão em normalidade.

Os sólidos voláteis dependem do tipo de dieta alimentar e dos aditivos utilizados na criação de suínos. Atualmente, a alimentação tem como objetivo principal melhorar o metabolismo e o aproveitamento dos nutrientes. Ou seja, aditivos e enzimas acrescentados na dieta animal podem reduzir a concentração de nitrogênio, fósforo, cálcio e outros nutrientes, bem como a proteína presente nas excretas (VEUM et al., 2006).

Miranda et al. (2012) encontraram diferenças significativas na composição de água residuária gerada por suínos na fase de crescimento e terminal quanto aos sólidos voláteis devido a alimentação com milho ou sorgo, com média de SV inicial de

3,86% e final de 5,22% para o milho e média de SV inicial de 3,61% e final de 4,24% para o milho.

Assim, a variação da carga de SV nas águas residuárias geradas da suinocultura podem ter uma grande amplitude devido principalmente ao tipo de fonte alimentar e aos aditivos e enzimas utilizados que podem influenciar a produção de biogás.

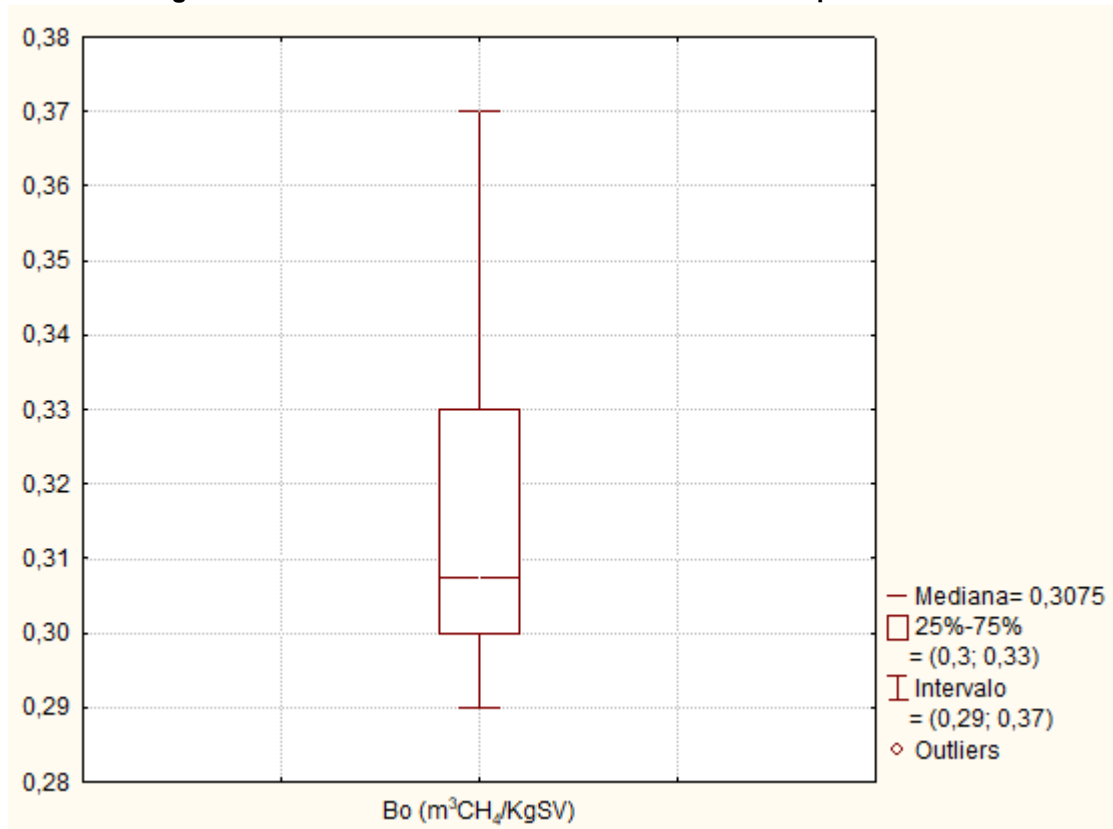
De forma resumida, observa-se que as características das águas residuárias de granja de suínos dependem do processo de produção e dos fatores que influenciam a composição dos resíduos líquidos, principalmente relativo a concentração de SV.

Vanotti e Szogi (2008) e Rodrigues et al. (2010) atribuem as variações de produção de biogás devido a (o): consumo de água, equipamentos e limpeza da granja, número de animais e sua variação nas granjas e a fase de crescimento do suíno. Assim, existem variáveis específicas que determinam as concentrações de matéria orgânica e a biodegradabilidade da água residuária.

Nos dados obtidos, observa-se a relação de 257,2 gSV/suíno produzidas por dia, valor relativamente próximo do valor de referência recomendado pelo IPCC (2006) de 300 gSV/suíno. A relação dos SVs com a DQO e a DBO obtida foram de aproximadamente 2,81 gSV/gDQO e de 6,55 gSV/gDBO.

As condições operacionais dos biodigestores também influenciam a produção de biogás, tais como: temperatura, tempo de detenção hidráulico, tempo de retenção celular, pH, ácidos voláteis, concentração de amônia e a diversidade microbiana. Porém, os SV (Figura 11) podem ser considerados como um dos principais parâmetros para determinação do potencial de produção de biogás (NSAIR et al., 2020).

Figura 11- Variável de conversão de sólidos voláteis para metano



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov o valor de D foi de 0,2302 para a produção de metano a partir dos SV com Dtab de 0,4543 correspondendo a normalidade dos dados com confiabilidade de 95%. O teste de Shapiro- Wilk obteve-se um p valor de 0,273. Em ambos os testes os dados coletados apresentam normalidade.

Existe apenas um outlier, o que pode ser considerado normal para o coeficiente de transformação de sólidos voláteis em metano.

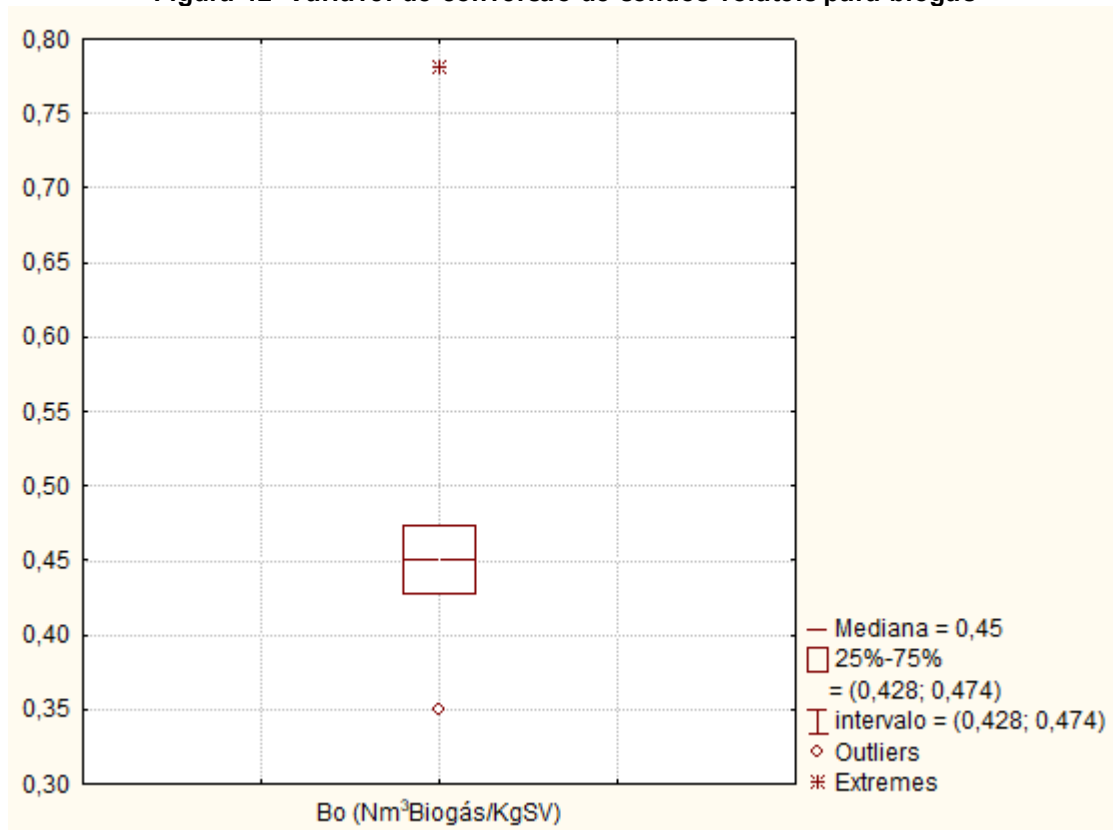
O valor médio de B_{0met} foi de 0,3186 Nm³CH₄/kgSV. Em estudo realizado por Lopes (2021) com modelos matemáticos (Chen-Hashimoto, 1983), CETESB (2006), DQO Conversão (Chernicharo, 2016), IPCC (2006), Deng (Deng et al., 2014), e Stover-Kincannon modificado (Yu et al., 1998) para estimativa da produção de biogás da suinocultura a partir de valores reais obteve como melhor modelo o desenvolvido por Chen-Hashimoto com um B_{0met} de 0,36 Nm³ CH₄/kgSV (adaptado de Chae et al., 2008). O valor é muito próximo do obtido neste trabalho com diferença de 11,5%.

Lopes (2021) conclui que os modelos do IPCC (2006) e da CETESB podem ser utilizados devido a sua maior simplicidade em termos de levantamento de dados

(número de animais, eficiência esperada do sistema e percentual médio de CH_4 no biogás), o que permite a sua aplicação em estudos de projeto de novos sistemas. Pois os demais modelos exigem maior conhecimento sobre as condições de operação e monitoramento do sistema de operação, criação, tratamento de águas residuárias e das condições ambientais e climáticas associadas a condições cinéticas e hidráulicas dos biodigestores.

As faixas recomendadas em IPCC (2006) e Che-Hashimoto (1983) variam de 0,29 a 0,52 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kgSV}$. Desta forma, o valor aproximado de 0,32 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kgSV}$ é um valor conservador para o cálculo do potencial de geração de metano a partir de resíduos da suinocultura, pois os sistemas de biodigestores são sistemas simplificados de tratamento com a variação da porcentagem de metano no biogás de forma geral é de 55 a 66%, sendo a média próxima de 60% (SILVA, 2019; ALVES JUNIOR, 2019; STIVAL, ERRERA, AISSE, 2017). A Figura 12 apresenta a análise de conversão dos sólidos voláteis para biogás.

Figura 12- Variável de conversão de sólidos voláteis para biogás



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov o valor de D foi de 0,3804 para a produção de metano a partir dos SV com D_{tab} de 0,4834

correspondendo a normalidade dos dados com confiabilidade de 95%. O valor médio de B0met foi de 0,482 Nm³/kgSV.

4.1.2 GEE do biogás da suinocultura

Em relação as emissões totais de gases de efeito estufa, o Brasil contribui com cerca de 3,2 % das emissões totais, ocupando o 5º lugar, ficando atrás da China, EUA, Rússia e Índia (SEEG, 2021).

A utilização de biogás originado de dejetos de granja de suínos permite mitigar efeitos relativos às mudanças climáticas originados da geração de gases em sistemas anaeróbios abertos e evitando a necessidade de compensação a ser realizada diretamente em áreas agrícolas (BARTOLI et al., 2019).

O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2021), apresentou no documento Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa, estimativas da emissão dos gases CO₂, CH₄, N₂O e HFCs gerados no Brasil.

Para o ano de 2020, como maior emissor de gases de efeito estufa do Brasil, encontram-se as mudanças de uso da terra e de floresta. O desmatamento do Cerrado e da Amazônia foi responsável pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa em cerca de 46% (998 milhões de toneladas de CO₂ equivalente) das emissões totais (SEEG, 2021).

Tabela 5- Emissões de GEE no Brasil 2020 (tCO₂e- GWP-AR5)

ANO	ENERGIA	PROCESSOS INDUSTRIAIS E USO DE PRODUTOS	AGROPECUÁRIA	USO DA TERRA, MUDANÇA DO USO DA TERRA E FLORESTAS	RESÍDUOS	TOTAL
2020	393.705.260	99.964.398	577.022.998	997.923.296	92.047.812	2.160.663.755

Fonte: SEEG (2021)

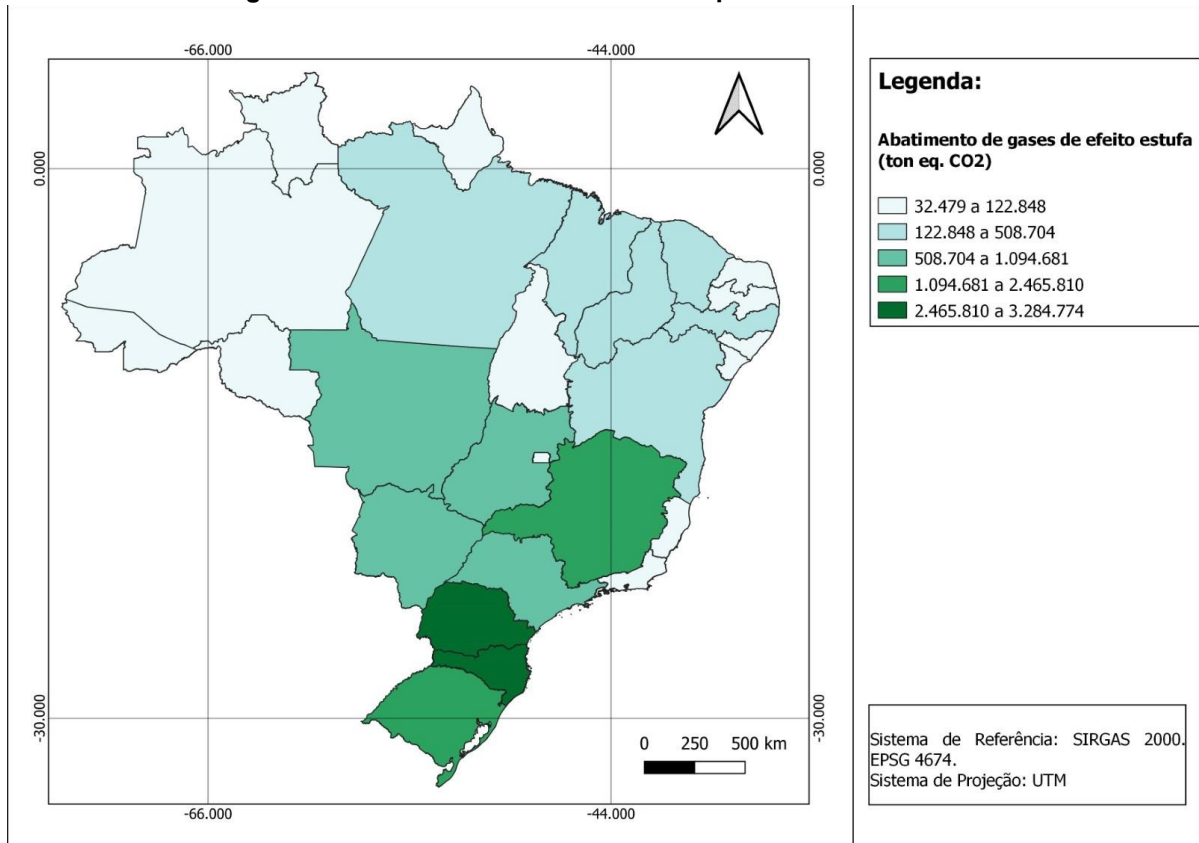
Em 2020, a média de CO₂ emitido por habitante brasileiro foi de 10,2 ton. e a média mundial foi de 6,7 ton.. No Brasil, o desmatamento provoca grande disparidade nas emissões per capita, nos estados do Mato Grosso e Rondônia a emissão per capita foi cerca de 4 vezes mais que nos EUA (SEEG, 2021). As emissões de CO₂ provenientes das atividades antrópicas atingiram cerca de 398,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente.

A agropecuária é responsável pela emissão de 577 milhões de ton de CO₂ equivalente, devido principalmente da contribuição provinda da fermentação entérica, com 373 milhões de ton CO₂equivalente, com destaque para os rebanhos de bovinos de corte e leite (SEEG, 2021).

No Brasil ocorre uma distribuição desigual do potencial de abatimento de GEE. Os estados do PR e SC apresentam as maiores possibilidades de abatimento de gases de efeito estufa (Figura 13) e de negociação de créditos de carbono.

No Apêndice A estão apresentados os dados detalhados por estado brasileiro do: número de suínos ciclo completo (bairas); sólidos voláteis (g.L⁻¹); variável de transformação de SV em metano (B₀) (Nm³ CH₄. Kg SV⁻¹); volume da água residuária (L. suíno⁻¹.d⁻¹); geração de metano a partir de SV (Nm³.d); eletricidade gerada anualmente (MWh); efeito estufa anual (ton eq. CO₂); demanda e consumo de energia 2020 (MWh); potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%).

Figura 13- Abatimento anual de GEE a partir da suinocultura



Fonte: Autoria própria (2022)

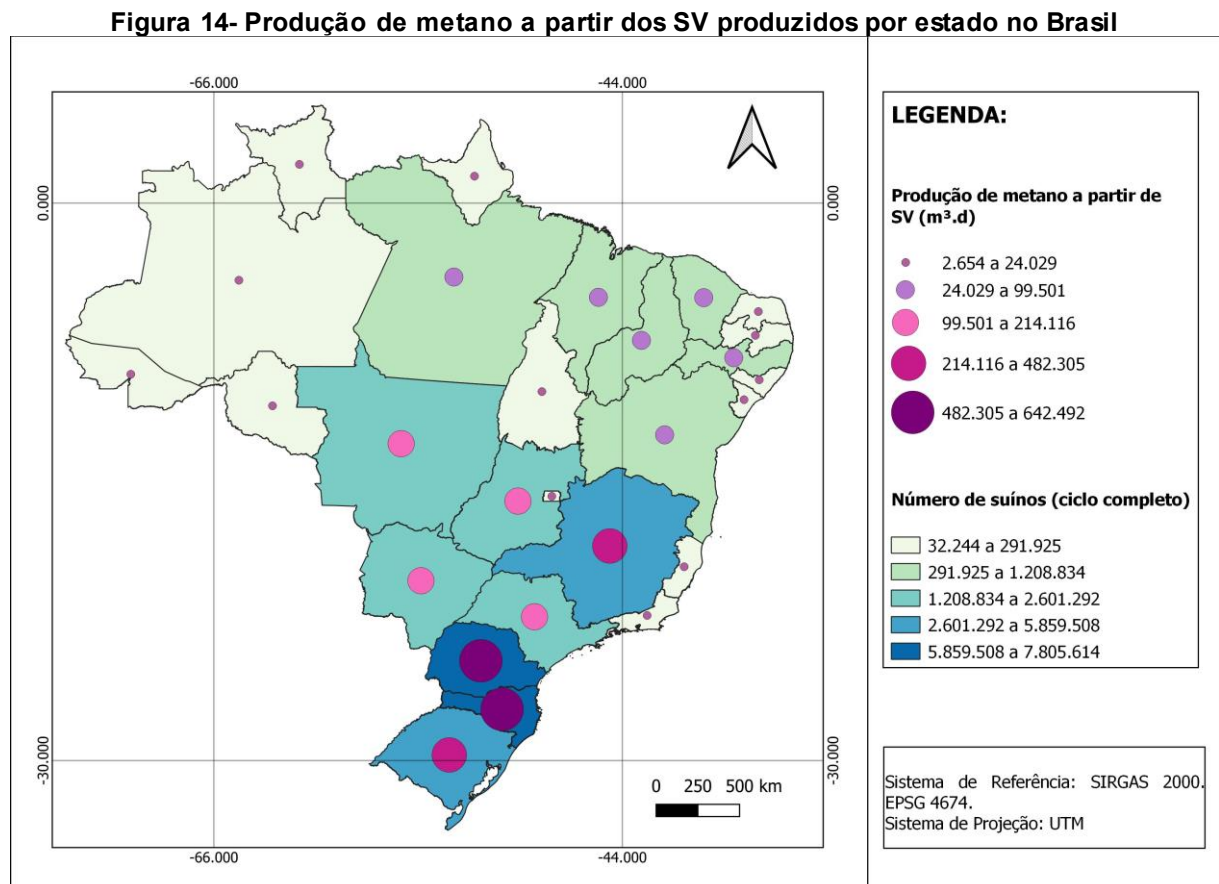
O abatimento total passível de ser realizado a partir do aproveitamento do biogás é de 17.305.982 ton. CO₂ equivalente anual. Ou seja, o equivalente a 4,34% das emissões antrópicas e a 5,69% das emissões da agropecuária, sem considerar o impacto da bovinocultura. Assim, a partir da utilização do biogás na suinocultura, pode-se viabilizar uma diminuição da geração dos gases de efeito estufa no Brasil.

Cherubini et al. (2015) por meio de estudo de ciclo de vida determinou o valor de 3.635,5 Kg CO₂ equivalente por suíno antes do abatedouro, composto por: alimentação na fase de leitão 498,2 Kg CO₂ equivalente, berçário 142,6 Kg CO₂ equivalente, alimentação na fase de terminação 2.268 Kg CO₂ equivalente e terminação 727,7 Kg CO₂ equivalente. O abatimento por suíno a partir da adoção de biodigestores para uso e queima do biogás promove um abatimento de 420,8 Kg CO₂ equivalente, o que corresponde a aproximadamente 11,6% do GEE produzido na fase de leitão e de terminação da suinocultura.

4.1.3 Produção potencial do metano no Brasil

O Brasil possui cerca de 41,12 milhões de suínos de ciclo completo. Os estados do PR e SC são os maiores produtores de suínos do país, contando com 6.944.541 e 7.805.614 de cabeças de ciclo completo, respectivamente. Seguido dos estados de MG e RS, com 5.229.317 e 5.859.508 cabeças, respectivamente.

Os resíduos líquidos da suinocultura necessitam de tratamento para atendimento das legislações ambientais: Lei 9.605/98 – Lei de Crimes Ambientais e Resolução CONAMA nº 430/2011, o permite a implementação de biodigestores para a geração de metano (Figura 14).



Fonte: Autoria própria (2022)

O levantamento realizado pelo Panorama do Biogás no Brasil de 2021 (CIBiogás, 2023) aponta uma produção de biogás em plantas em operação de 240,63 milhões de Nm³ ao ano de biogás no setor agropecuário, o que equivaleria a aproximadamente 659.260 Nm³ por dia de biogás produzido.

Portanto, observa-se o enorme potencial da suinocultura que produz aproximadamente 3.384.997 Nm³ de metano por dia e 5.207.687 Nm³ de biogás por dia.

O uso de esterqueiras como solução de tratamento gera GEE que são liberados para a atmosfera. Esta metodologia é muito utilizada por pequenas propriedades rurais com tempos de armazenamento muito estendidos de até 120 dias, o que aumenta a emissão de GEE (EMBRAPA, 2023).

Outro aspecto importante a ser considerado é o risco das esterqueiras impactarem o solo devido a: baixa eficiência de remoção de material orgânico e nutrientes; infiltração dos resíduos no solo; altas taxas de fertirrigação.

Nesse contexto, a implementação de sistemas de biodigestores como solução de arranjo tecnológico na produção de suínos apresenta-se como uma solução viável com ações associadas a políticas públicas.

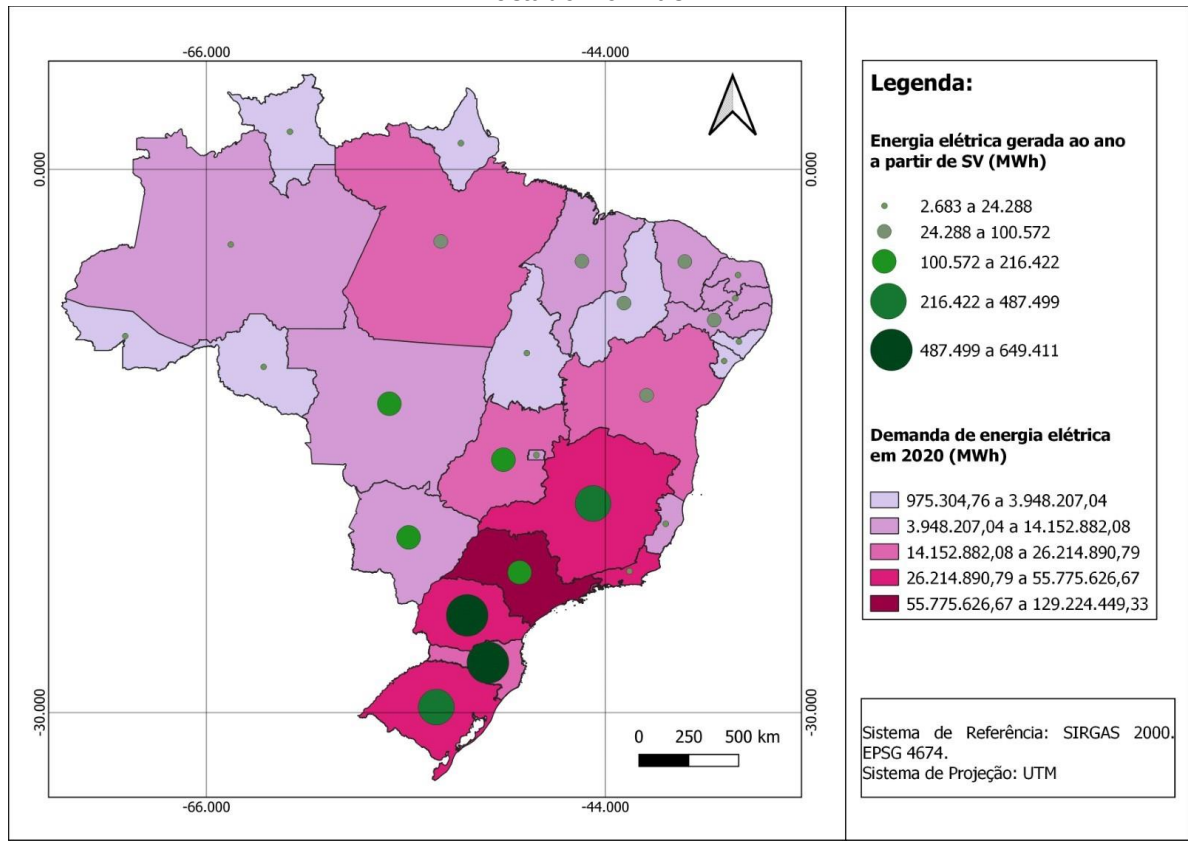
4.1.4 Análise de energia a partir do biogás da suinocultura

No Brasil, a matriz energética brasileira ainda é composta predominantemente por fontes não renováveis: 33,1 % de energia provinda do petróleo e derivados, 4,9% carvão mineral, 1,3% nuclear, 11,8% gás natural, 0,6% outras não renováveis. E as fontes renováveis são compostas por: 12,6% hidráulica, 19,1% derivados da cana de açúcar, 8,9% lenha e carvão vegetal, 7,7% outras fontes renováveis (EPE, 2021).

A matriz elétrica é composta predominantemente pelas fontes renováveis, sendo 84,8% produções nacionais de origem renovável, sendo 65,2% hidráulica, 8,8% eólica, 1,66% solar e 9,1% da oferta de energia elétrica provém da biomassa (lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações) (EPE, 2021).

Na análise da produção de energia potencial da suinocultura a partir do biogás gerado pela biomassa, observa-se a Figura 15.

Figura 15- Relação da demanda e geração de energia elétrica a partir do número de suínos por estado no Brasil.

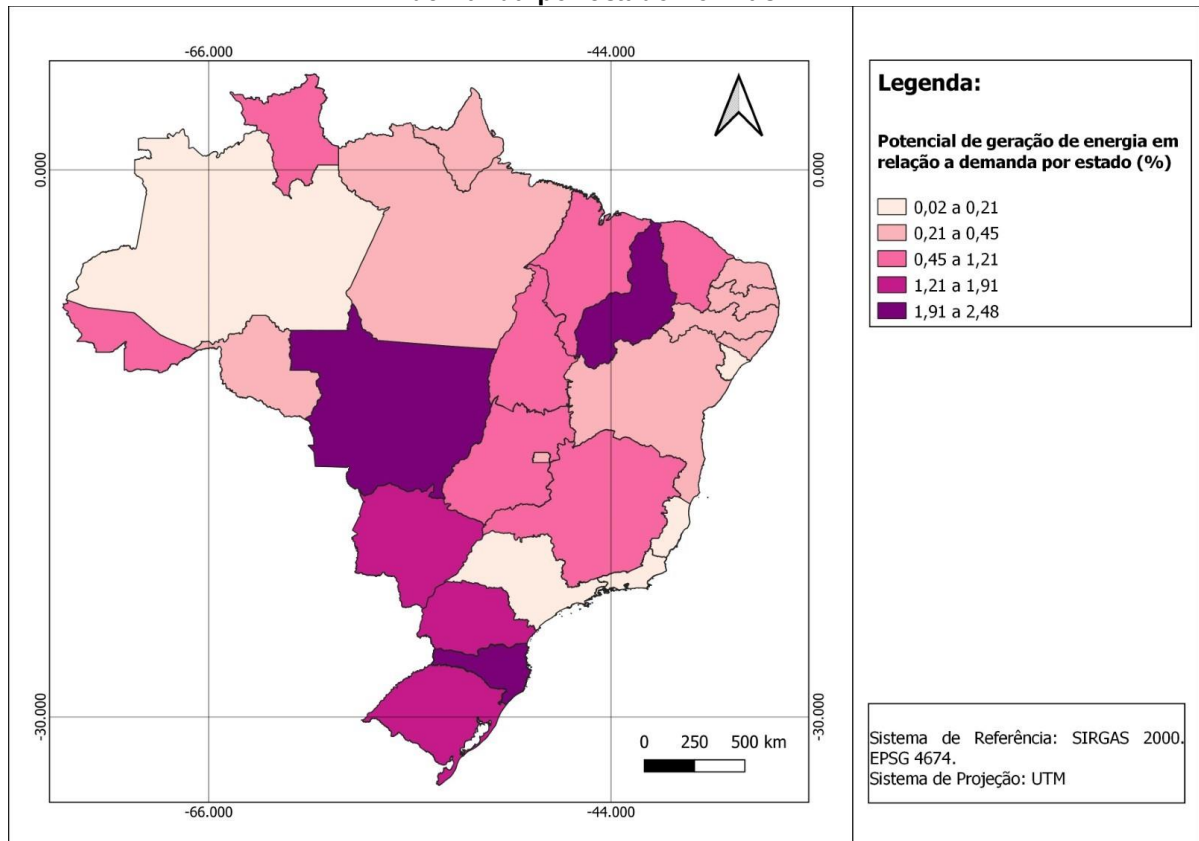


Fonte: Autoria própria (2022)

Em termos de geração de energia, os estados do Paraná e Santa Catarina possuem a possibilidade de gerar no ano 577.771 MW.h e 649.411 MW.h, respectivamente. Esta geração de energia é viável tecnologicamente por meio da GD como estratégia de desenvolvimento local.

O Brasil possui a média de 1,55% de potencial de geração de energia a partir da biomassa relativa à demanda de energia por estado (Figura 16). Os estados de SC, PI e MT apresentam os maiores potenciais de geração de energia em relação a demanda, com 2,48, 2,37 e 2,21 %, respectivamente. Seguido pelos estados do MS, PR e RS, com 1,91, 1,80 e 1,65 %.

Figura 16- Potencial de geração de energia a partir do número de suínos em relação a demanda por estado no Brasil.



Fonte: Autoria própria (2022)

Os estados do RJ e SP possuem o menor potencial de geração de energia em relação a demanda do estado, apenas 0,02 e 0,10%, devido principalmente a grande demanda de energia. O estado de SP possui a maior demanda de energia elétrica, 129,22 milhões de MWh/ano, devido seu grande índice populacional. A quantidade de energia elétrica que pode ser gerada a partir de SV oriundos da suinocultura seria de 126.000 MW.h, sendo relativamente pequena em relação a demanda. Já o estado do PR possui uma demanda de 32 milhões de MWh/ano, que permitiria uma geração significativa de energia a partir da biomassa da suinocultura.

4.2 Bovinocultura de leite

4.2.1 Estatística descritiva da biomassa da bovinocultura de leite

A bovinocultura de leite é uma das principais atividades agrícolas do Brasil. Além da produção de leite, também pode ser uma importante fonte de biogás.

No Brasil, a produção de biogás a partir da bovinocultura de leite ainda é relativamente incipiente, mas vem ganhando destaque como uma alternativa de

energia renovável e sustentável. Além de ser uma fonte de energia limpa, a produção de biogás a partir de dejetos bovinos também ajuda a reduzir problemas ambientais, como a poluição do solo e da água, causados pelo armazenamento inadequado dos dejetos.

No entanto, ainda é necessário incentivar a implantação de sistemas de digestão anaeróbia e a utilização do biogás produzido, para que se possa ampliar a sua produção e aproveitar o seu potencial.

As principais variáveis que contribuem para a geração de biogás em sistemas de biodigestores estão relacionadas com o volume de água residuária gerada, a quantidade de sólidos voláteis presentes e a taxa de transformação de carbono orgânico disponível para metano ($B0_{met}$) a partir do material orgânico disponível. A tabela 6 apresenta valores médios de literatura, intervalo de confiança, mediana, valores máximos e mínimos, coeficiente de variação e o desvio padrão.

Tabela 6- Análise descritiva de valores para as variáveis relacionadas a geração de metano/biogás para bovinocultura

Variáveis	Amostras	Média	Intervalo de Confiança (95%)		Mediana	Valor Mínimo	Valor Máximo	Coef. Variação	Desvio Padrão
SV (g/L)	23,00	82,96	62,05	103,87	74,00	15,50	169,50	58,28	48,35
Vazão Efluente (L/d)	5,00	44,21	23,40	65,02	40,00	21,00	65,00	37,91	16,76
B0 (m ³ CH ₄ /Kg SV)	7,00	0,21	0,11	0,32	0,21	0,10	0,42	52,34	0,11

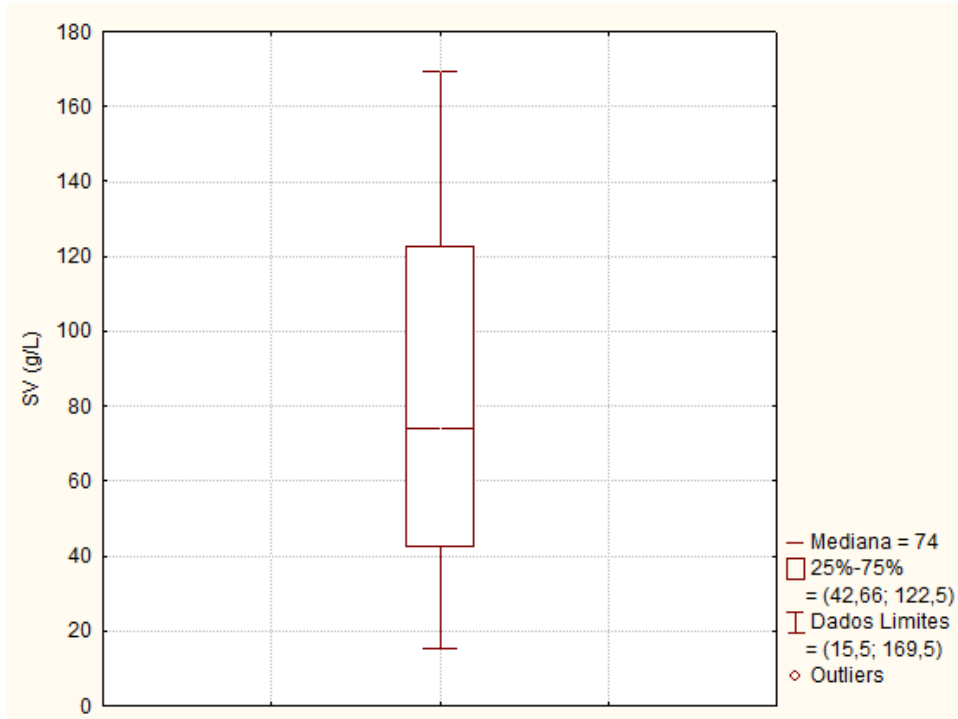
Fonte: Autoria própria (2022)

A digestão anaeróbia permite transformar e estabilizar as fezes de vaca extraindo seu potencial de geração de energia renovável e reduzindo seu impacto ambiental. Geralmente, as fezes frescas de vaca possuem cerca de 12 a 14% de sólidos totais, podendo chegar até 25% caso adicionados resíduos de cama, como a palha (SAAD; MASSÉ, 2015).

A média de sólidos voláteis observada neste estudo foi de 82,96 g SV/L com desvio padrão de 48,35 g SV/L. Orhororo, Ebunilo e Sadjere (2017) destacam a importância dos SV como fator primordial para a geração de metano nos sistemas

anaeróbios de biodigestão. Desta forma, de modo geral, quanto maior a concentração de SV, maior o potencial de geração de biogás. A Figura 17 apresenta os valores de concentração de SV levantados em literatura.

Figura 17- Box plot dos valores de concentração de sólidos voláteis em água residuária da bovinocultura.

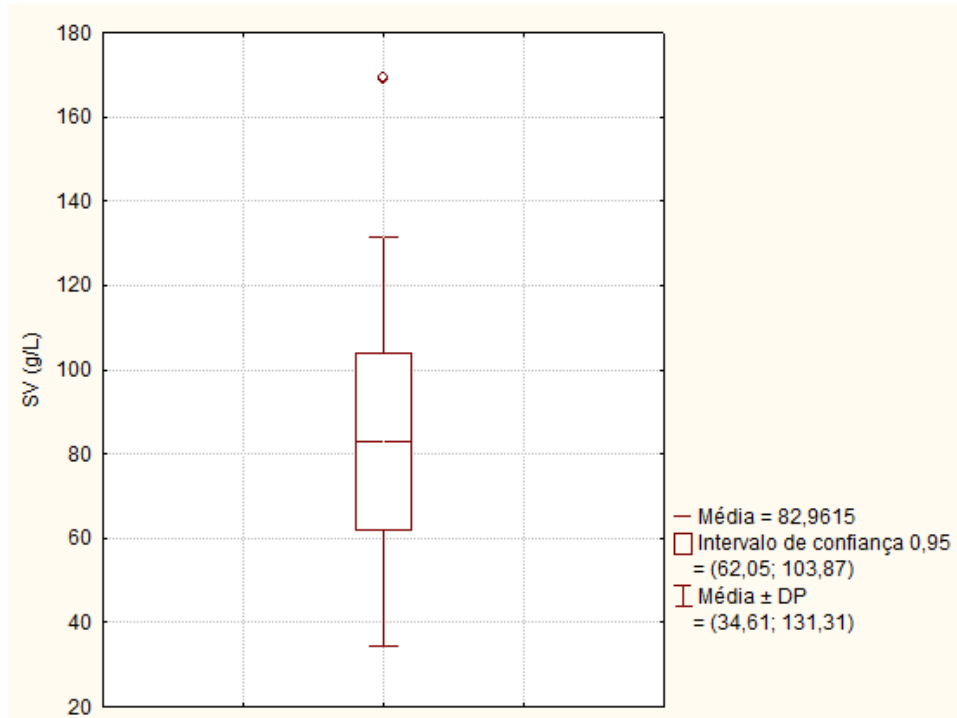


Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov com D igual a 0,16 menor que D_{tab} de 0,275 com significância de 0,95; então aceita-se a hipótese de normalidade dos valores. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk apresentou p valor de 0,105 que é superior a 0,05, também apresentando a distribuição dos dados em normalidade. Dados extremos ou *outliers* não foram observados.

Cerca de 50% dos sólidos voláteis presentes no esterco do gado leiteiro são de degradação rápida. Os SV (Figura 18) podem ser considerados como um dos principais parâmetros para determinação do potencial de produção de biogás (SAAD; MASSÉ, 2015; NSAIR et al., 2020).

Figura 18- Intervalo de confiança e desvio padrão da concentração de sólidos voláteis em água residuária da bovinocultura.



Fonte: Autoria própria (2022)

O intervalo de confiança observado foi de 62,05 a 103,87 gSV/L com 95% de confiança. As grandes variações observadas nos coeficientes de variação dos dados inseridos no estudo demonstram que muitas variáveis contribuem para que exista uma maior dispersão de valores numéricos, tais como a alimentação e a forma de limpeza utilizada assim como ocorre para suínos.

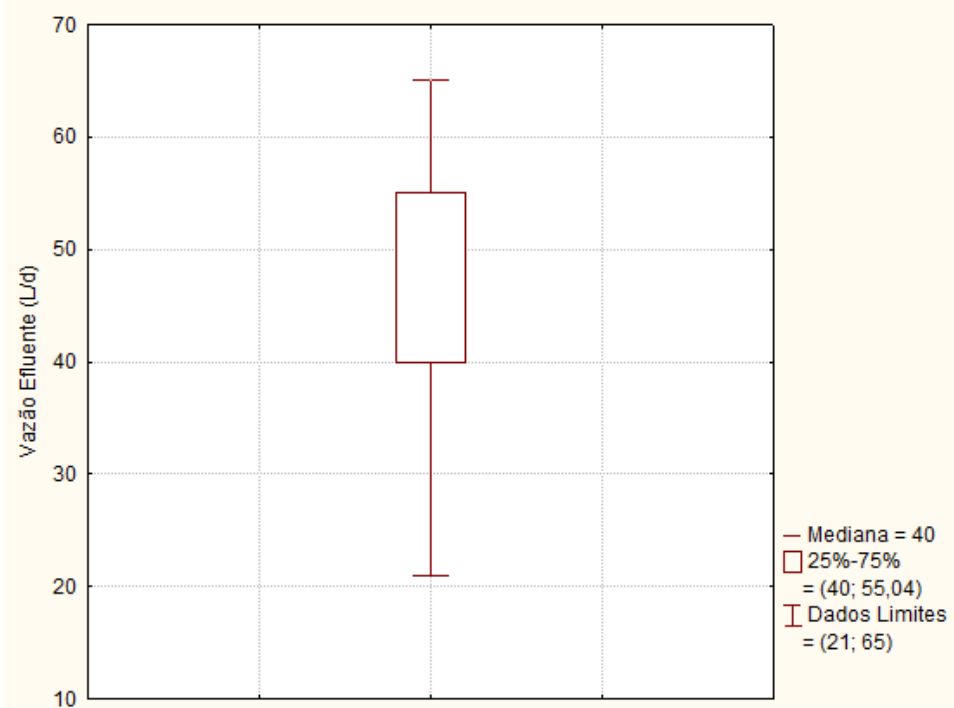
Desta forma, o tipo de alimentação dos animais pode afetar significativamente a concentração de carga orgânica presente nos excrementos, o que, por sua vez, pode aumentar a eficiência da digestão anaeróbia e a produção de biogás. Um estudo realizado por Chiumenti et al. (2019) examinou o impacto da alimentação em três fazendas de vacas leiteiras. Os animais foram tratados com diferentes tipos de alimentos, incluindo feno, silagem e concentrados, com diferentes níveis de Sólidos Totais (ST), Fibra Detergente Neutro (FDN), Fibra Detergente Ácido (ADF) e Lignina Detergente Ácido (ADL). Os resultados mostraram que a alimentação com maior concentração de sólidos totais resultou em uma produção de biogás mais elevada, com 15,15% dos sólidos totais e 84,39% dos sólidos voláteis.

Além disso, as condições operacionais dos biodigestores também influenciam a produção de biogás, tais como: temperatura, tempo de detenção hidráulico, tempo

de retenção celular, pH, ácidos voláteis, concentração de amônia e a diversidade microbiana (NSAIR et al., 2020)

A quantidade de água utilizada para limpeza das baias de confinamento, reduzem a concentração de sólidos nos resíduos coletados, por isso é importante, sempre que possível, utilizar sistemas de raspagem, reduzindo a quantidade de água necessária para limpeza. A forma de limpeza e o tipo de alimentação dos bovinos tem correlação direta com a vazão de resíduos orgânicos gerados. A Figura 19 apresenta vazões médias de dejetos gerados em sistemas de bovinocultura de leite.

Figura 19- Box plot dos valores de vazão água residuária na bovinocultura

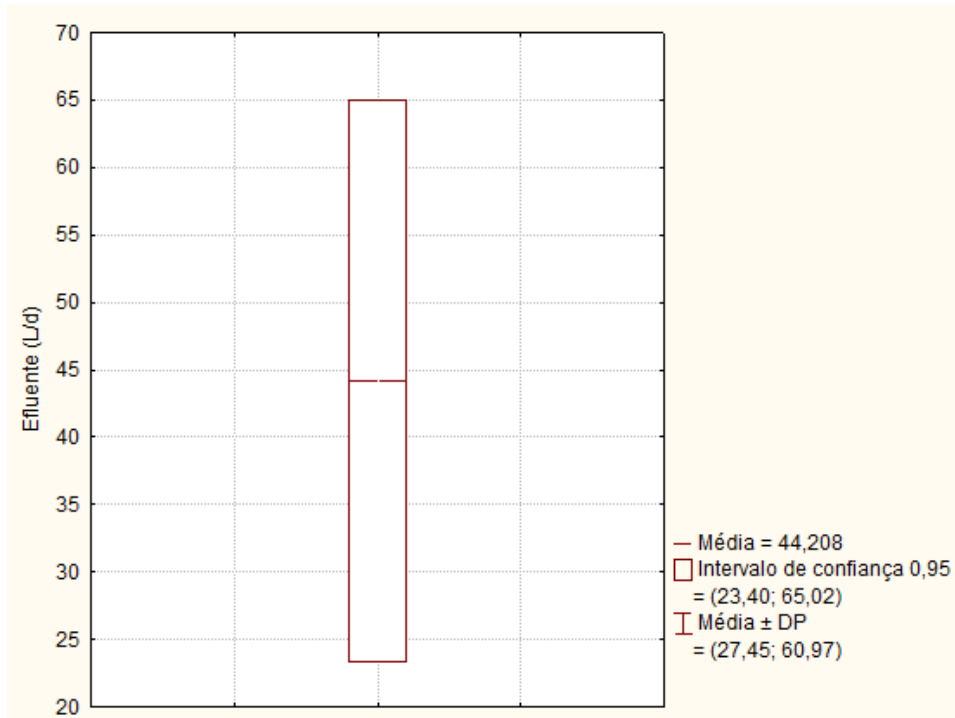


Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov com D igual a 0,20 menor que Dtab de 0,563 com significância de 0,95; então aceita a hipótese de normalidade dos valores. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk apresentou p valor de 0,82, também apresentando a distribuição dos dados em normalidade. Dados extremos ou *outliers* não foram observados.

O valor médio de geração de dejetos foi de 44,2 L/d por bovino de leite com mediana igual a 40 L/d (Figura 20).

Figura 20- Intervalo de confiança e desvio padrão de valores de vazão água residuária na bovinocultura.

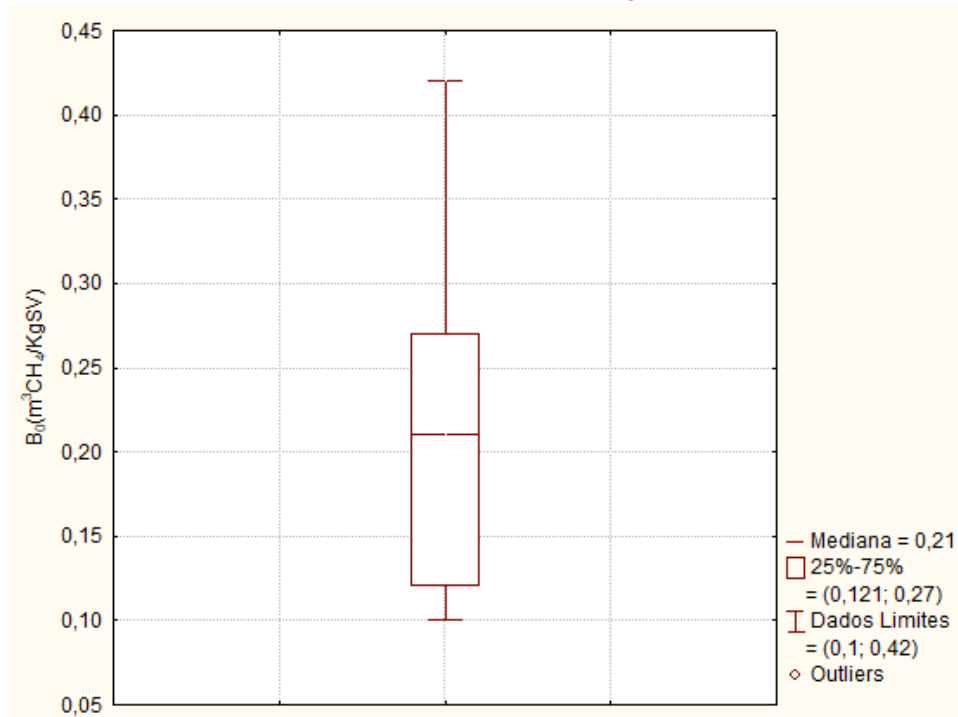


Fonte: Autoria própria (2022)

O Bo_{met} apresentou valor médio de $0,2144 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}$ (Figura 21), muito próximo da mediana com $0,21 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgSV}$.

Observa-se que a porcentagem de metano no biogás de forma geral é de 55 a 66 %, sendo a média próxima de 60 % (SILVA, 2019; ALVES JUNIOR, 2019; STIVAL, ERRERA, AISSE, 2017).

Figura 21- Variável de conversão de sólidos voláteis para metano na Bovinocultura

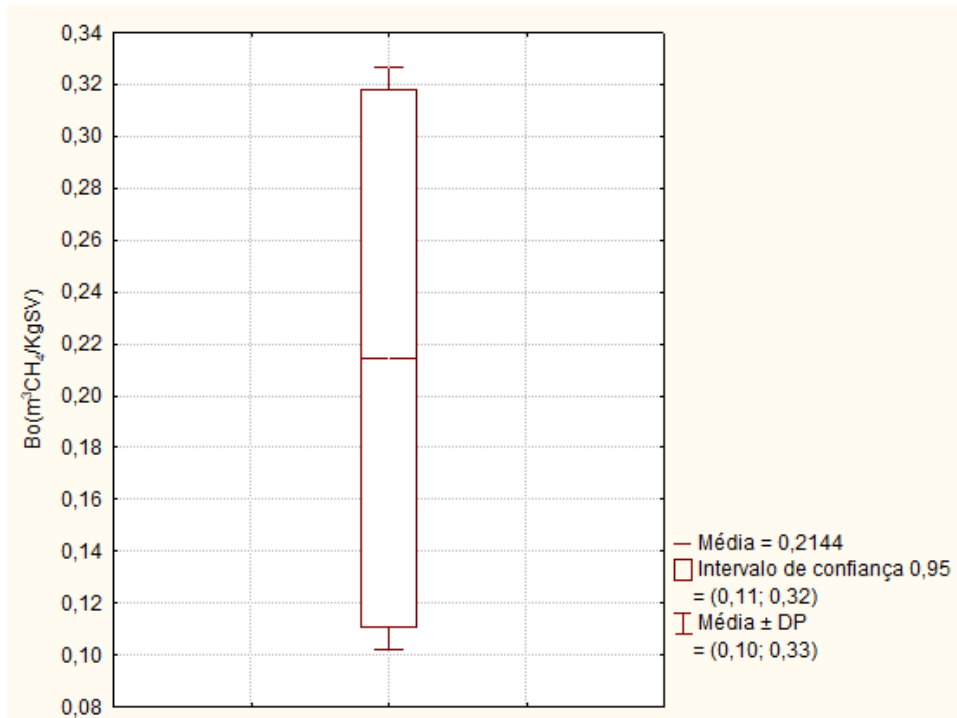


Fonte Autoria própria (2022)

O teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov apresentou D igual a 0,203 menor que D_{tab} de 0,483 com significância de 0,95; então aceita-se a hipótese de normalidade dos valores. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk apresentou p valor de 0,36, também apresentando a distribuição dos dados em normalidade. Dados extremos ou *outliers* não foram observados.

A Figura 22 apresenta o intervalo de confiança e a média com o desvio padrão do B_{met} .

Figura 22- Intervalo de confiança e desvio padrão de valores de conversão de metano relativo aos SV na bovinocultura



Fonte: Autoria própria (2022)

Os resíduos sólidos dos dejetos e os materiais de cama são enviados a tanques e lagoas anaeróbias, resultando em maior concentração e acúmulo de sólidos, e geração de gases (VARMA et al., 2021). Desta forma, a falta de adoção de sistemas de biodigestores aumenta o impacto dos GEE.

4.2.2 GEE do biogás da bovinocultura de leite

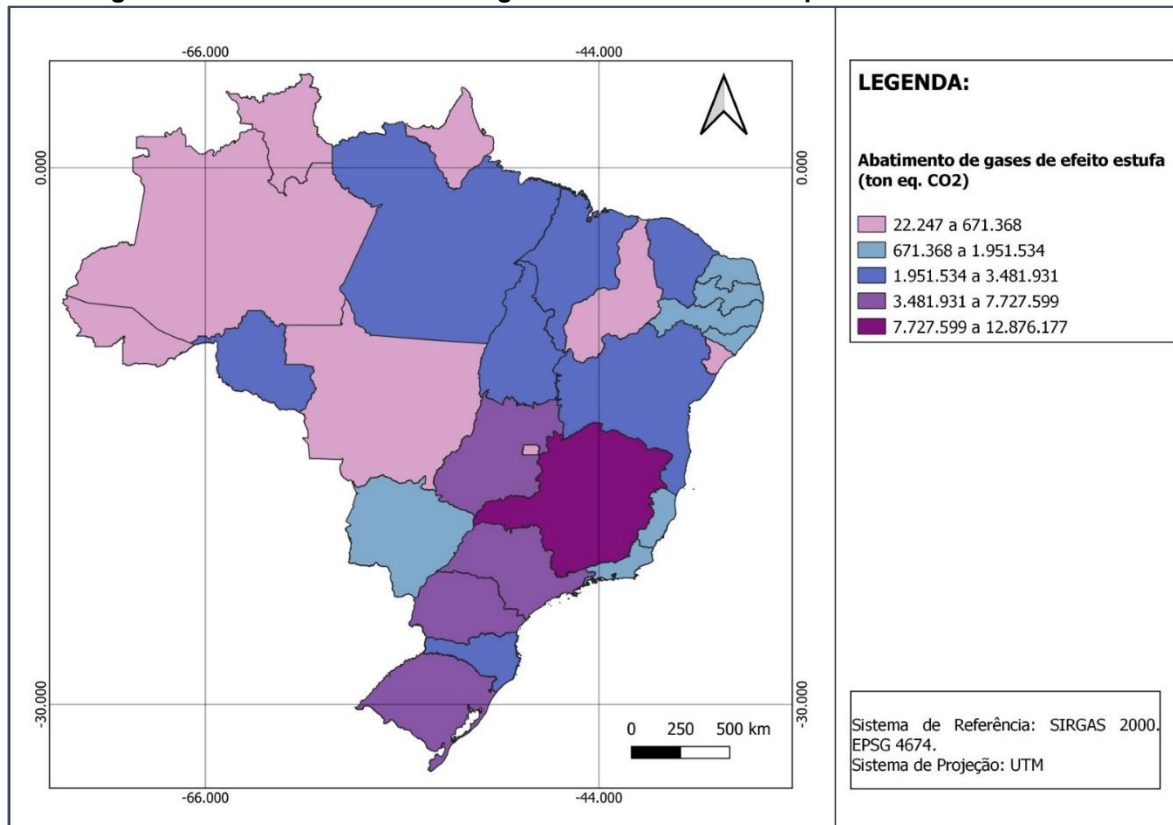
As propriedades rurais de bovinocultura de leite são as maiores contribuidoras de emissões de GEE no ciclo de vida da cadeia produtiva do leite (ROTZ, 2018). A bovinocultura de leite no Brasil pode ser realizada de três formas: intensiva, semi-extensiva e extensiva. A forma extensiva tem uma produtividade muito baixa em termos de produção de leite total (THOMA et al., 2013). Assim, este estudo está centrado em sistemas semi-extensivos e intensivos.

FAO (2010) estima em 2,4 KgCO_{2eq}/KgFPCM (valor bruto de leite corrigido pelo teor de gordura e proteína em 26%), o que corresponde a aproximadamente 448 milhões de ton. CO_{2eq} considerando-se uma produção mundial de leite de 887 Mton com 81% originada da bovinocultura (FAO, 2022). No Brasil, a produção de leite em 2020 foi de 35.305 milhões de litros (IBGE, 2022), o que corresponde a aproximadamente 22 milhões de ton. CO_{2eq}.

O Brasil possui cerca de 16,167 milhões de vacas leiteiras. O estado de MG possui cerca de 3.122.017 cabeças de vacas leiteiras e os estados do GO, PR, RS e SP contam com 1.873.669, 1.329.009, 1.160.993 e 1.009.582 cabeças, respectivamente, apresentando os maiores potenciais de diminuição de gases de efeito estufa e de negociação de créditos de carbono (Figura 23).

No Apêndice B estão apresentados os dados detalhados por estado brasileiro do: número de cabeças de vacas leiteiras; sólidos voláteis (SV) (g.L^{-1}); variável de transformação de SV em metano (B_0) ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{Kg SV}^{-1}$); volume da água residuária ($\text{L. bovino}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); geração de metano a partir de SV ($\text{Nm}^3 \cdot \text{d}$); eletricidade gerada anualmente (MWh); efeito estufa anual (ton eq. CO_2); energia térmica (MJ/d); demanda de consumo de energia 2020 (MWh); potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%).

Figura 23- Abatimento anual de gases de efeito estufa a partir da bovinocultura



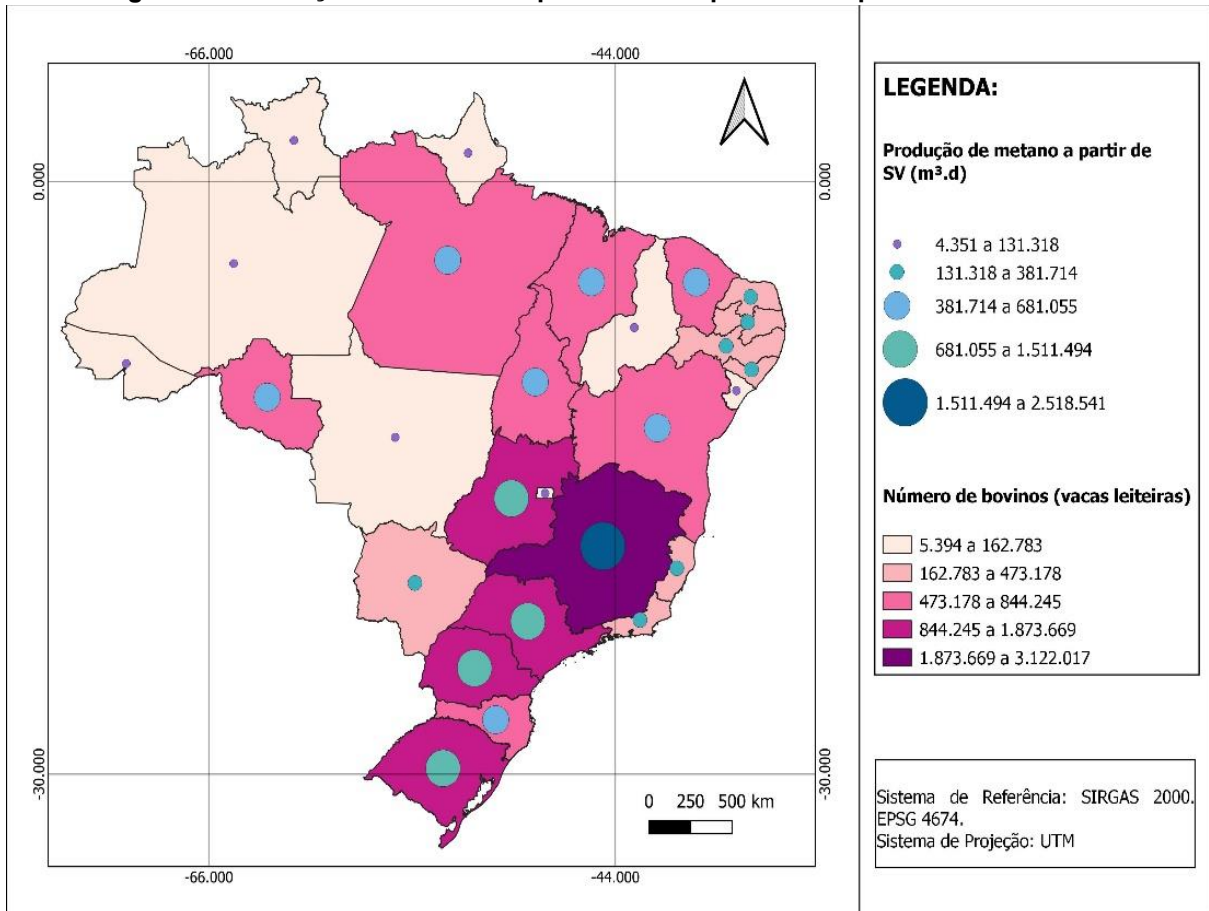
Fonte: Autoria própria (2022)

4.2.3 Análise da produção de metano a partir da biomassa da bovinocultura de leite

No Brasil, a produção potencial de metano foi de $13.042.472 \text{ Nm}^3/\text{dia}$ e de biogás de $20.065.342 \text{ Nm}^3/\text{dia}$. Os principais estados com maior potencial de

produção de biogás a partir dos SV foram MG, RS, PR, SP e GO (Figura 24). Os Estados com menor produção potencial de metano e biogás foram MT, AC, AM, RR, AP, PI, SE.

Figura 24- Produção de metano a partir dos SV produzidos por estado no Brasil

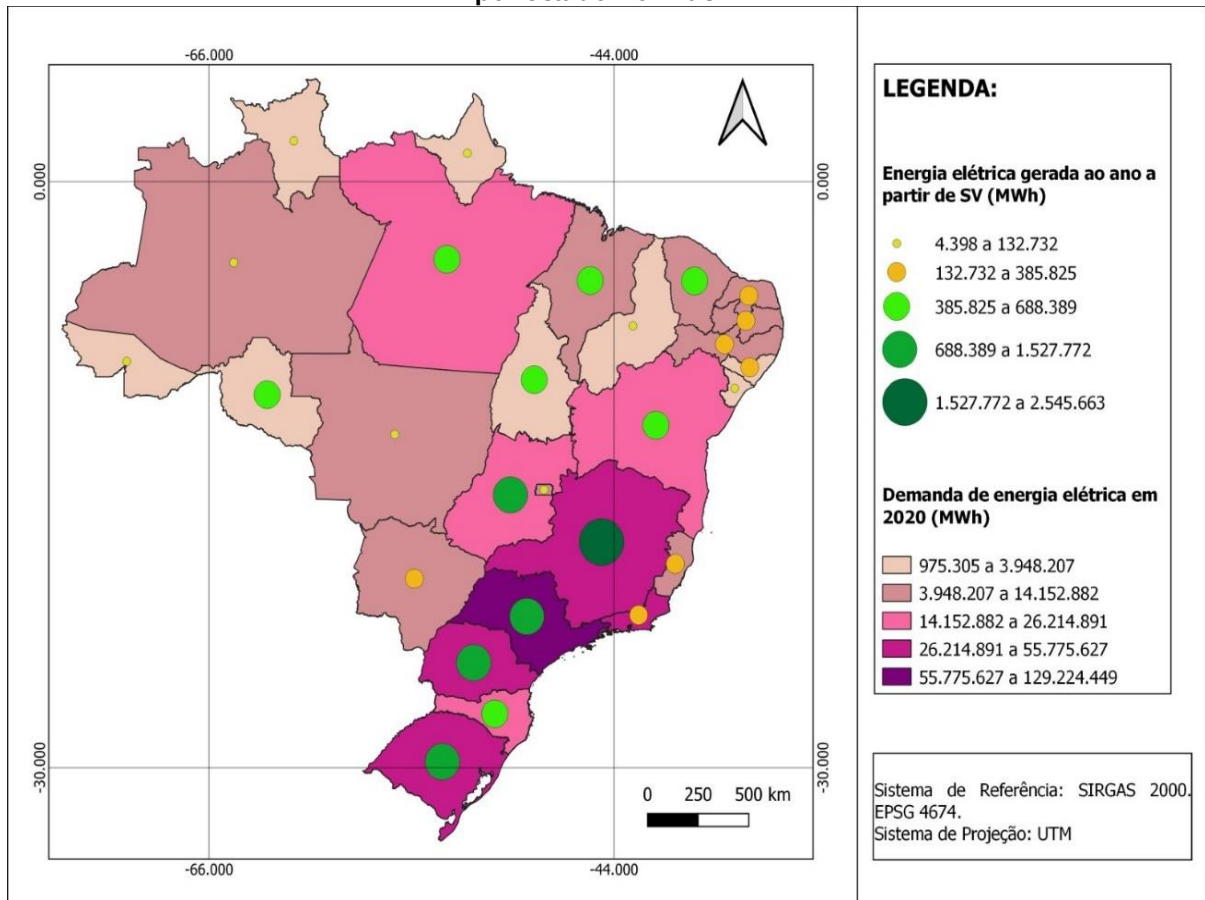


Fonte: Autoria própria (2022)

O índice de produção de biogás por bovino de leite obtido neste trabalho foi 806 LCH₄/cabeça.

No ano de 2020, a oferta total de energia na matriz elétrica brasileira foi de 621,3 TWh, sendo 9,1 % gerado a partir da biomassa, representando cerca de 56,5 TWh (EPE, 2021). A energia elétrica potencial a partir da biomassa da bovinocultura de leite obtida neste estudo foi de 13,182 TWh (Figura 25).

Figura 25- Relação da demanda e geração de energia elétrica a partir do número de bovinos por estado no Brasil.

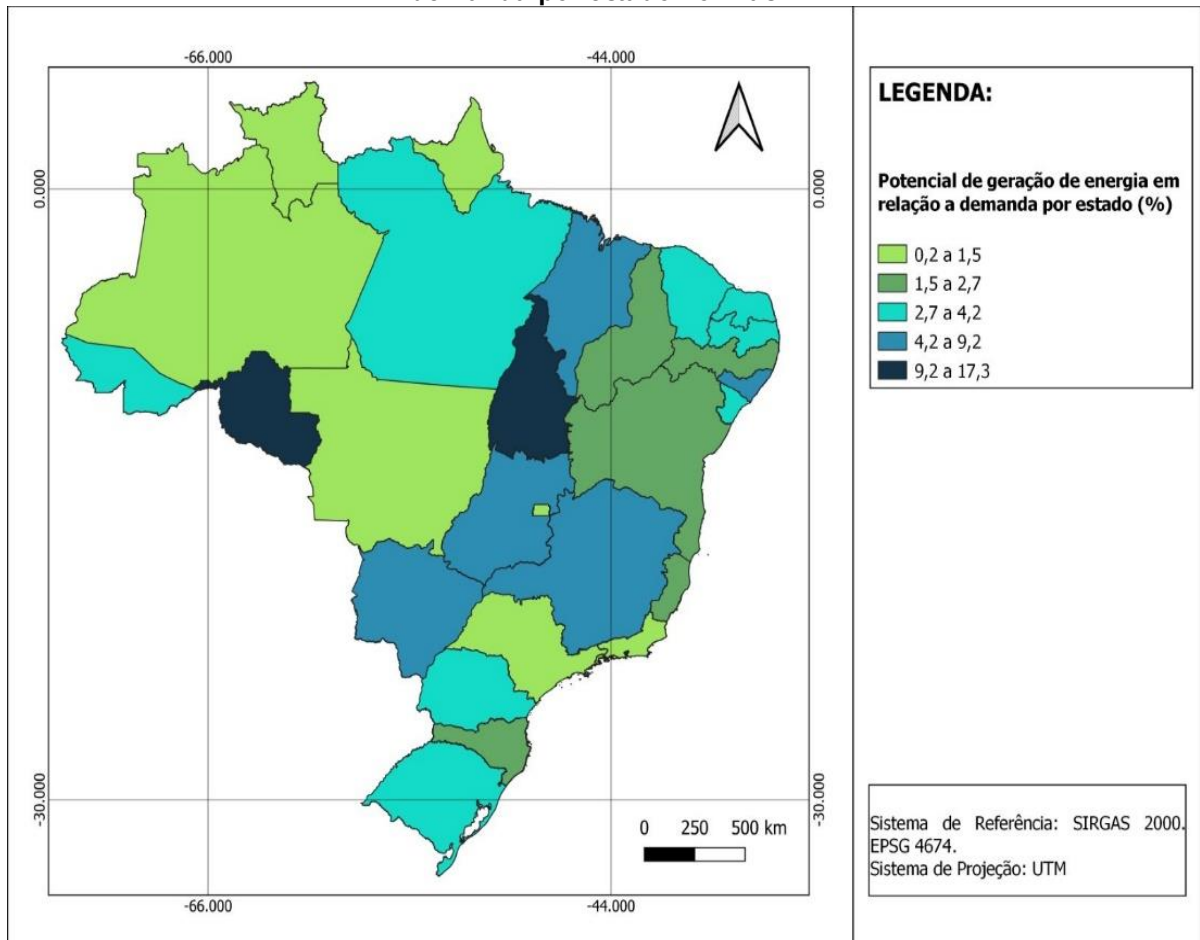


Fonte: Autoria própria (2022)

O Estado de São Paulo é o principal consumidor de energia elétrica do país, com uma demanda anual de 129,22 TWh. Isso se deve ao seu elevado índice populacional. No entanto, a produção de energia elétrica a partir dos subprodutos da bovinocultura de leite não é suficiente para atender à demanda do Estado. Apenas 0,823 TWh de energia neste Estado podem ser gerados anualmente a partir desta fonte (vide Figura 26).

O estado de MG poderia gerar cerca de 2,545 TWh/ano com uma demanda de 55,775 TWh/ano. Já, em oposição, o estado do AP possui a menor geração potencial de energia elétrica equivalente a 0,4398 TWh/ano.

Figura 26- Potencial de geração de energia a partir do número de bovinos em relação a demanda por estado no Brasil.



Fonte: Autoria própria (2022)

O Brasil possui a média de 4,15 % de potencial de geração de energia por estado. Os estados de TO e RO apresentam os maiores potenciais de geração de energia em relação a demanda por Estado, com 17,34 % e 16,75%.

4.3 Abatedouro

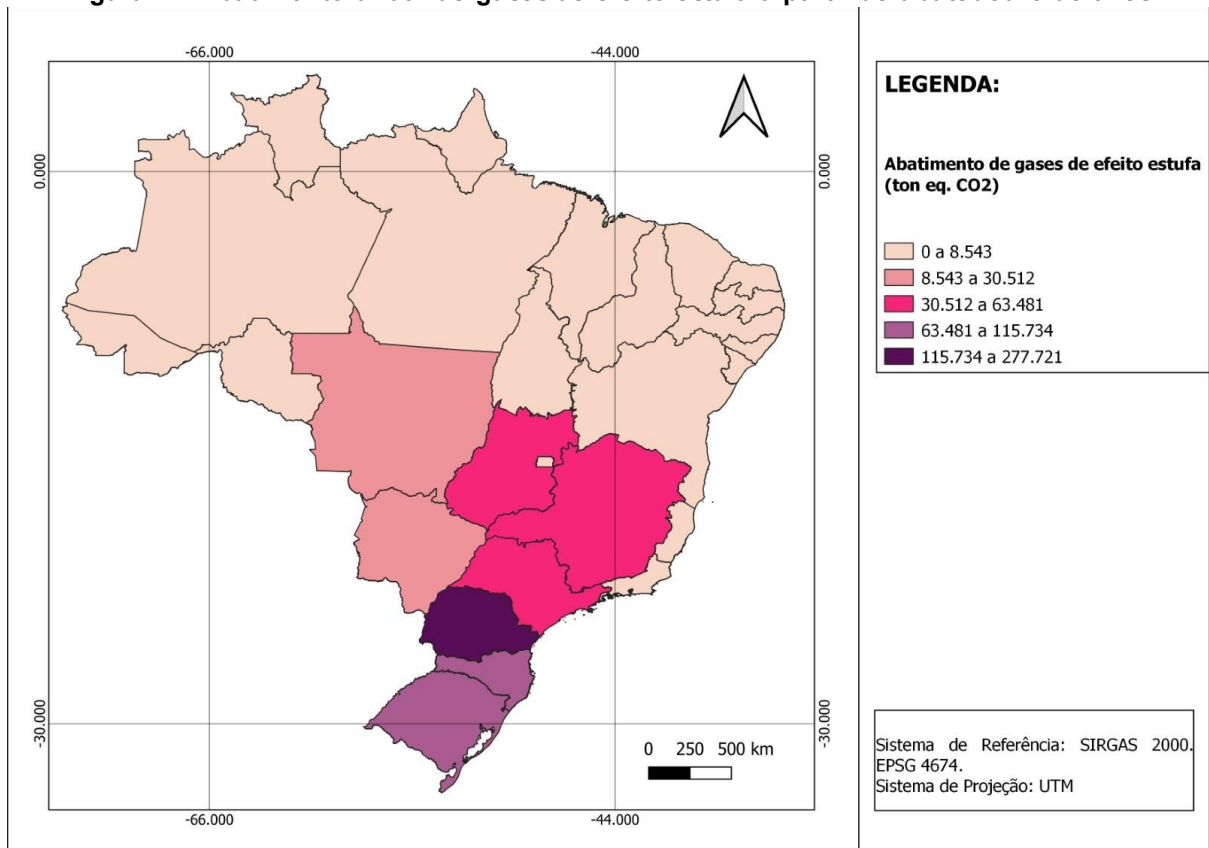
4.3.1 Abatedouro aves

O Brasil abate cerca de 5,48 bilhões de aves por ano. O estado do PR abate cerca de 1,96 bilhões de cabeças de aves e os estados de SC e RS contam com 819 milhões e 765 milhões de abate respectivamente, apresentando os maiores potenciais de diminuição de gases de efeito estufa e de negociação de créditos de carbono (Figura 27).

No Apêndice C estão apresentados os dados detalhados por estado brasileiro do: número de abate de aves (dia); sólidos voláteis (SV) (g.L^{-1}); variável de

transformação de SV para metano (B_o) ($Nm^3 CH_4 \cdot Kg SV^{-1}$); volume de água residuária ($L \cdot ave^{-1} \cdot d^{-1}$); água residuária gerada por dia ($L \cdot dia^{-1}$); carga SV ($Kg SV/d$); geração de metano a partir de SV ($Nm^3 \cdot d$); eletricidade gerada anualmente (MWh); efeito estufa anual (ton eq. CO_2); energia térmica (MJ/d); demanda de consumo de energia 2020 (MWh); potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)

Figura 27- Abatimento anual de gases de efeito estufa a partir de abatedouro de aves



Fonte: Autoria própria (2022)

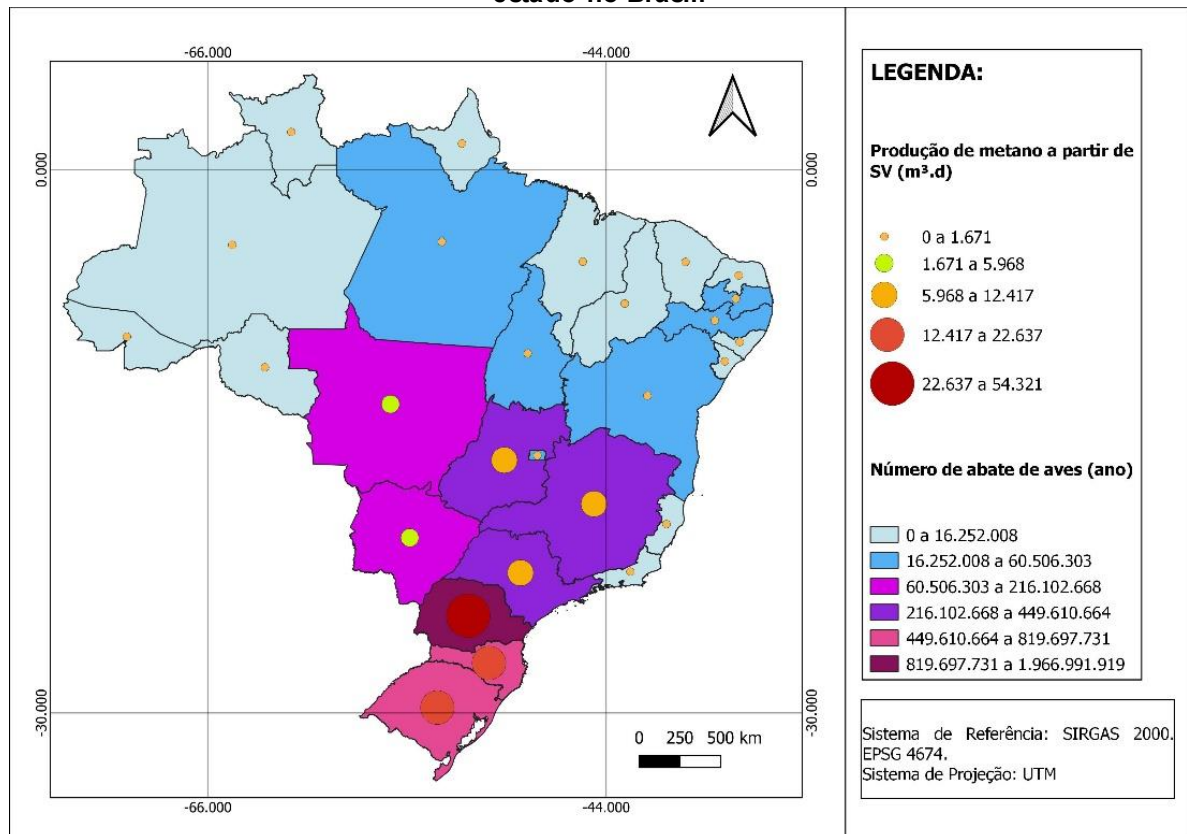
O potencial total de abatimento de gases de efeito estufa obtido neste estudo foi de aproximadamente 774.627 tonCO₂eq. De acordo com o Relatório Anual de 2021 da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) e o site do Sistema de Informações Gerenciais do Serviço de Inspeção Federal (SIGSIF) e vigilância epidemiológica em saúde animal, alguns estados como: AC, AL, AP, AM, CE, ES, MA, PI, RJ, RN, RR, SE não apresentaram dados do número de abate/ano.

O estado do PR possui um abatimento potencial de 277.721 tonCO₂eq. anual, seguida pelos estados de SC e RS com 11.734 tonCO₂eq. e 108.094 tonCO₂eq., respectivamente.

Em sistemas de biodigestores com aproveitamento do biogás, o abatimento de GEE por ave no abatedouro seria de 0,141 kgCO_{2eq}/ave abatida, que corresponde de 5,2% (MARTINELLI et al., 2020) a 10,6% (LIMA et al., 2019) dos GEE produzidos na fase de abate da ave. Em relação ao abatimento de GEE por massa na unidade de kg de ave abatida o valor obtido foi de 61,3 gCO_{2eq}/Kgave abatida (IBGE, 2022).

Os estados do PR, SC e RS possuem os maiores números de abates de aves no Brasil, conseqüentemente possuem os maiores potenciais de produção de biogás a partir dos SV da biomassa (Figura 28).

Figura 28- Produção de Biogás a partir do número de abate de aves e dos SV produzidos por estado no Brasil.



Fonte: Autoria própria (2022)

O potencial de produção de biogás em abatedouros de aves foi de 233.099 Nm³/d e de metano 151.515 Nm³/d. O estado do PR possui o potencial de produzir 54.321 Nm³/d de metano, seguido pelos estados de SC e do RS com 22.637 Nm³/d e 21.143 Nm³/d, respectivamente.

A região Norte e Nordeste apresentam as menores potencialidades de produção de biogás a partir da biomassa de abatedouro de aves. A região Sul possui

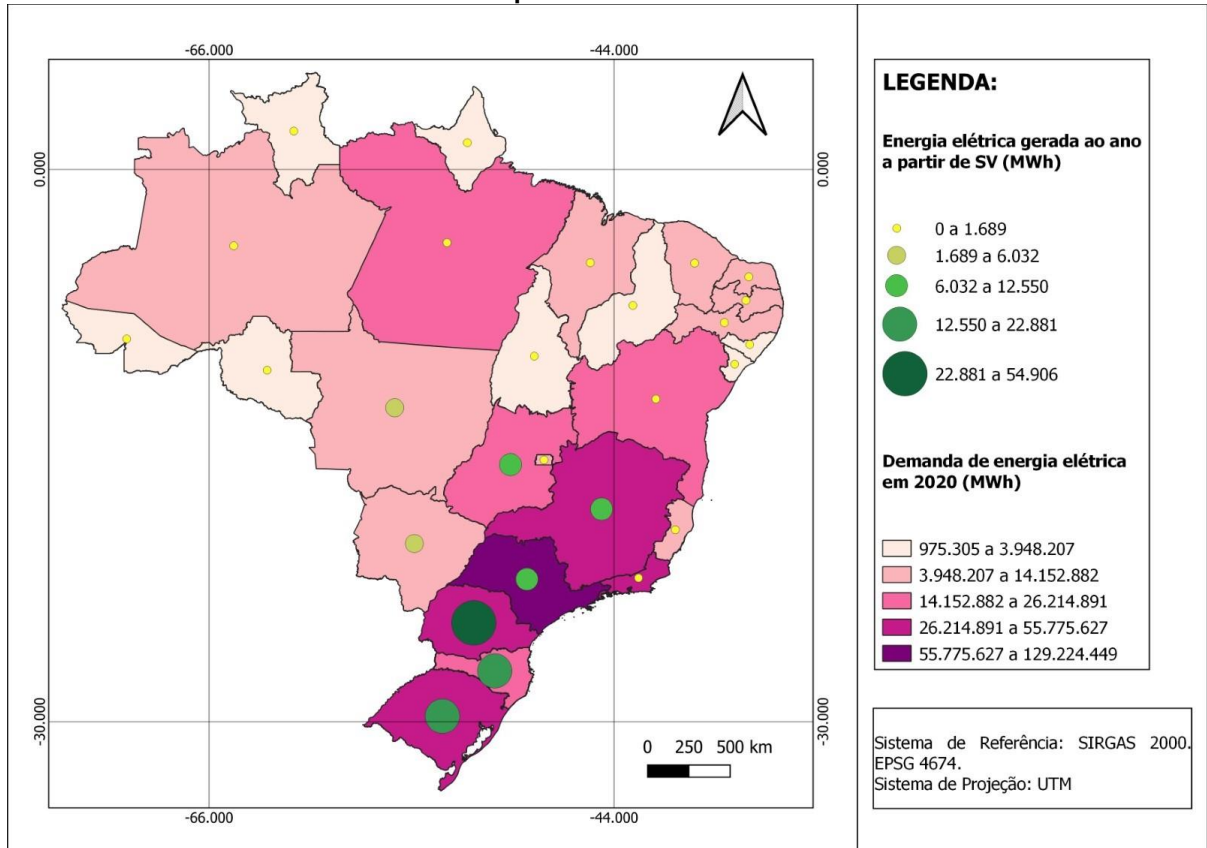
o maior potencial para geração de biogás, seguido da região Sudeste e da região Centro-Oeste, excetuando-se os estados do RJ e do ES.

A produção de biogás por ave abatida ficou próxima de 15 L/ave_{abatida} a partir de uma taxa de conversão de 0,252 Nm³CH₄/KgSV (FINEP, 2010) e com a geração de águas residuárias próxima de 20 L/ave (SANTOS, 2003; MATSUMARA, 2007), que pode ser considerada para um abatedouro avícola onde o consumo de água esteja racionalizado.

A produção de SV está associado a um valor médio de concentração de 2,0 gSV/L (COSTA, 2016; SUNADA et al., 2012; COSMANN, 2015; ARAÚJO, 2021; COMBATT, 2014; JESUS, 2018; LIMA, 2014; KAZMIERCZAK et al., 2016) com desvio padrão de 0,62 gSV/L. Os SV correspondem a aproximadamente 83% dos ST (NJOYA, IWA, NTWAMPE, 2019; COSTA, 2016; SUNADA et al., 2012; COSMANN, 2015; LIMA, 2010, ARAÚJO, 2021; COMBATT, 2014; JESUS, 2018; LIMA, 2014).

A energia elétrica potencial a ser gerada no ano foi de aproximadamente 153 GWh com o destaque para o estado do PR que pode gerar cerca de 54,906 GWh/ano com uma demanda total de energia elétrica de 32.000 de GWh/ano. Já os estados de SC e do RS possuem o potencial de produção de energia elétrica a partir da biomassa avícola de 22,88 GWh/ano e 21,37 GWh/ano, respectivamente (Figura 29).

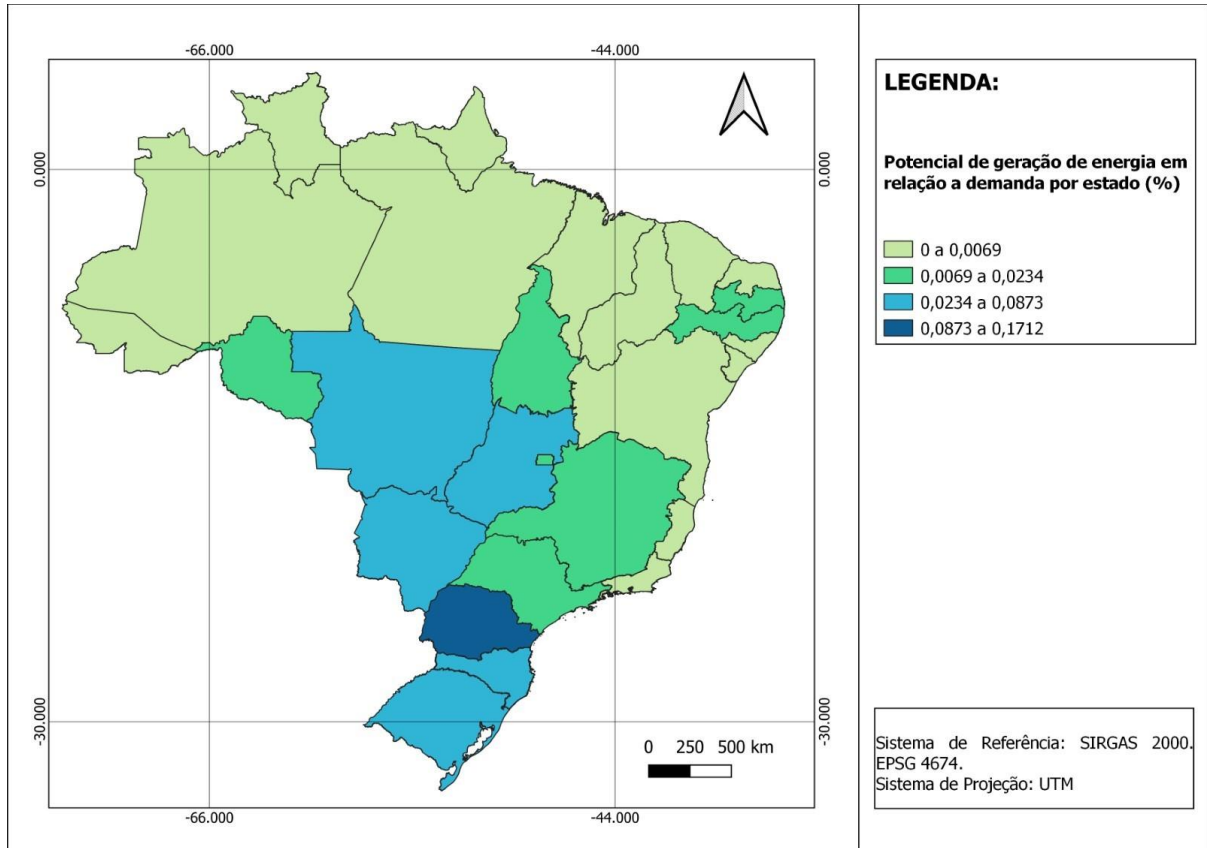
Figura 29- Relação da demanda e geração de energia elétrica a partir do número de abate de aves por estado no Brasil.



Fonte: Autoria própria (2022)

Já o estado de SP que possui a maior demanda possui o potencial de 12,55 GWh a ser gerado no ano. Desta forma a participação e a importância da energia de biomassa de abatedouros avícolas podem variar de estado para estado (vide Figura 30).

Figura 30- Potencial de geração de energia a partir do abate de aves em relação a demanda por estado no Brasil.



Fonte: Autoria própria (2022)

O Brasil possui a média de 0,025% de potencial de geração de energia por estado. Os estados do PR e SC apresentam os maiores potenciais de geração de energia em relação a demanda por estado, com 0,17 % e 0,087%.

Exceto os estados não contabilizados, a BA possui o menor potencial de geração de energia em relação a demanda por estado, apenas 0,0051%, seguido do estado do PA, com 0,0069%.

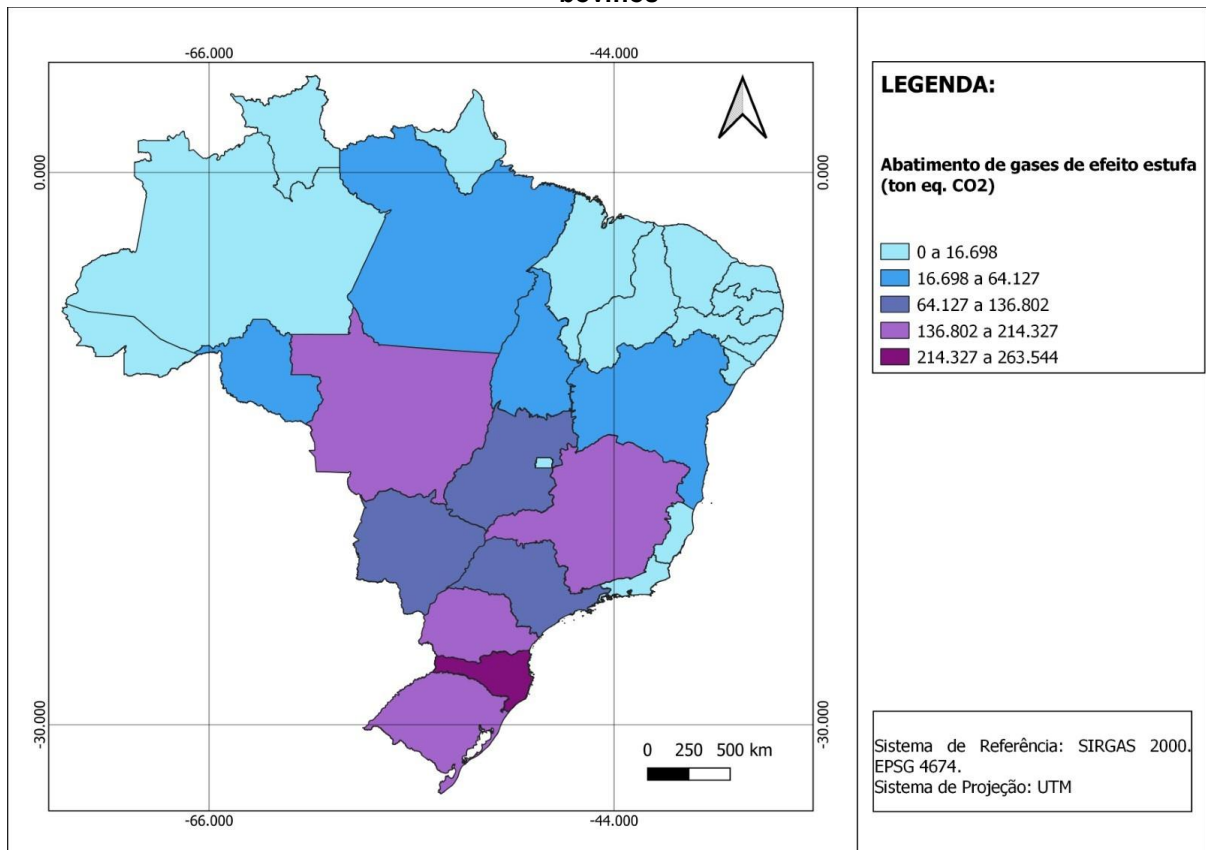
4.3.2 Abatedouro de suínos e bovinos

No Brasil são realizados cerca de 78,96 milhões de abates de suínos e bovinos por ano. No estado do PR são abatidos cerca de 11,4 milhões de cabeças e os estados de SC, RS, MG e MT contabilizam 14,8 milhões, 10,3 milhões, 8,68 milhões e 8 milhões de abates, respectivamente. Estes estados apresentam os maiores potenciais de diminuição de gases de efeito estufa e de negociação de créditos de carbono (Figura 31).

No Apêndice D estão apresentados os dados detalhados por estado brasileiro do: número de abate suínos e bovinos (dia); sólidos voláteis (SV) (g.L^{-1}); variável de

transformação de SV para metano (B_o) ($Nm^3 CH_4 \cdot Kg SV^{-1}$); volume de água residuária (L. bovino); volume de água residuária (L. suíno); água residuária total gerada por dia ($L \cdot d^{-1}$); carga SV ($Kg SV/d$); geração de metano a partir de SV ($Nm^3 \cdot d$); eletricidade gerada anualmente (MWh); efeito estufa anual ($ton eq. CO_2$); energia térmica (MJ/d); demanda de consumo de energia 2020 (MWh); potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)

Figura 31- Abatimento anual de gases de efeito estufa a partir de abatedouro de suínos e bovinos



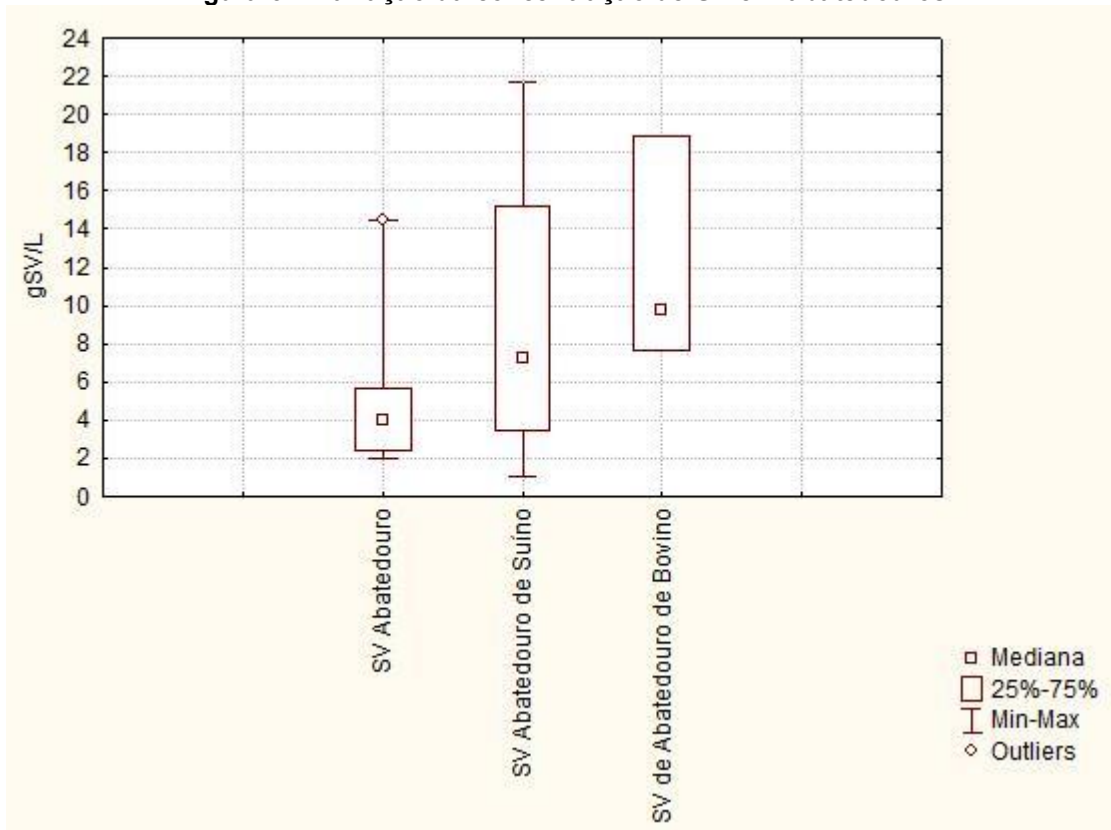
Fonte: Autoria própria (2022)

O abatimento total do Brasil com a adoção de sistemas de biodigestores a partir do uso do biogás pela sua queima seria de 1.710.305 tonCO_{2eq}. O estado de SC possui o maior potencial de abatimento de biogás anual de 263.544 tonCO_{2eq}, seguido do PR com 214.327 tonCO_{2eq}, RS com 200.082 tonCO_{2eq}, MG com 181.984 tonCO_{2eq} e MT com 197.985 tonCO_{2eq}.

Os estados com menor potencial de abatimento de gás de efeito estufa a partir do abate de suínos e bovinos encontram-se na região Norte e Nordeste, com a inclusão dos estados do ES e do RJ.

Neste estudo observou-se a existência de dados de abatedouros de suínos e bovinos em uma amostra composta de 6 dados para a concentração de SV com valor médio de $5,43 \pm 4,69$ gSV/L (MARCOS et al., 2017; CIEMAT, 1995; MURUGAN, 2020; WATCHER, 2017; DABABAT, 2019). Para abatedouros de suínos observou-se uma amostra de 4 dados com valor de concentração médio de $9,34 \pm 8,81$ gSV/L (GALVAN et al., 2021; ABALDE, FLOTATS, FERNANDEZ, 2016; FREGUE et al. 2019; KAZMIERCZAK et al., 2016). Já para abatedouros de bovinos observou-se uma amostra de 3 dados com valor de concentração médio de $12,12 \pm 5,99$ gSV/L (MUSA et al., 2020; SANCHES et al. 2021, MUSA et al., 2018). A Figura 32 apresenta as variações de concentração de SV levantadas em literatura.

Figura 32- Variação da concentração de SV em abatedouros



Fonte: Autoria própria (2022)

Assim, é possível notar uma faixa de valores mais baixos para os matadouros de suínos e bovinos conjuntos, que no Brasil são geralmente classificados como matadouros regionais e municipais. Já os matadouros de bovinos apresentam uma faixa de valores intermediários, enquanto que os matadouros de suínos apresentam o valor mais elevado e o mais baixo de SV.

Devido à grande variação observada em todos os tipos de matadouros, com coeficiente de variação de 86% para matadouros de suínos e bovinos, 49% para matadouros de bovinos e 94% para matadouros de suínos; foi adotado um valor médio para a concentração de SV para ambos os tipos de matadouros. O valor médio obtido para concentração de SV para abatedouros relativos a suínos e bovinos foi de $8,2 \pm 6,53$ gSV/L.

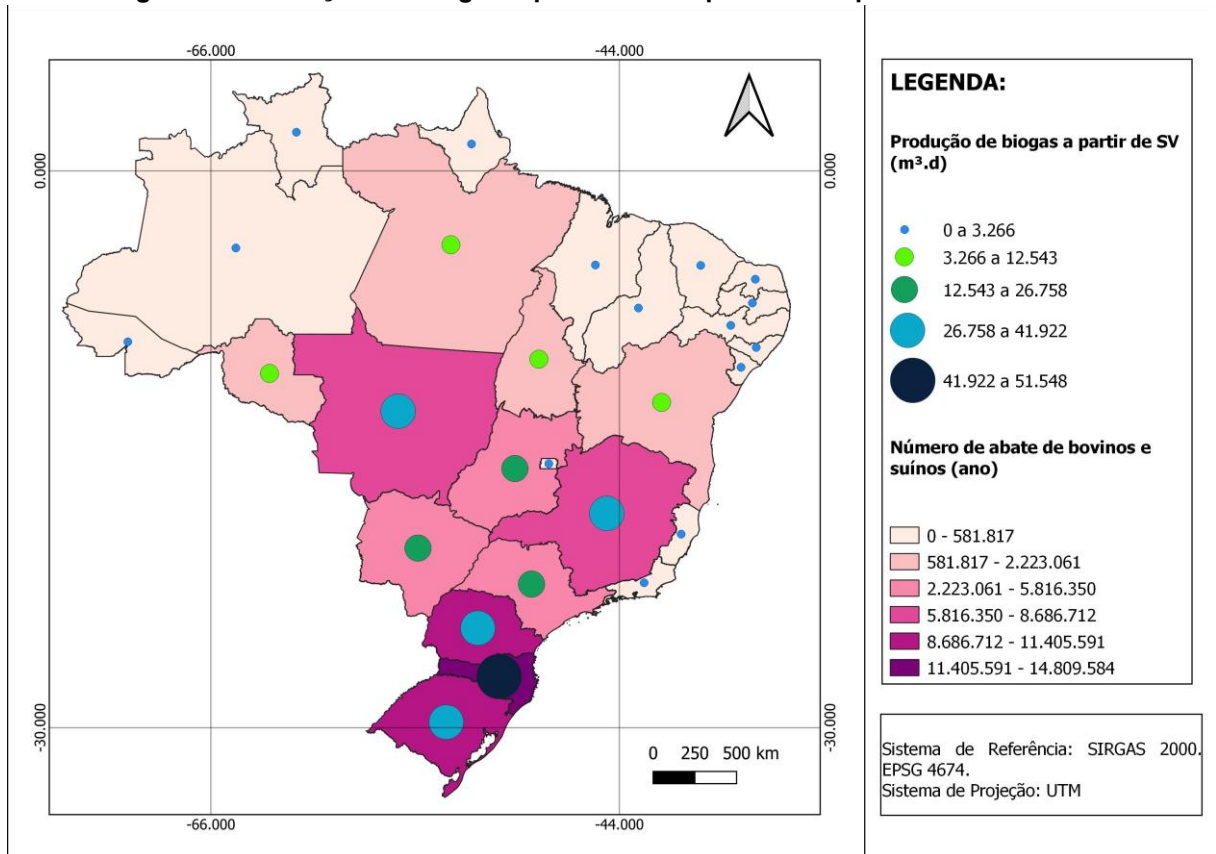
Em estudo realizado no Brasil por Cherubini et al. (2015) verificou-se no abate de suínos uma geração de GEE de 48,86 kgCO₂ por tonelada de carcaça. Bondt et al. (2020) observou para abatedouros de suínos na Holanda um valor de 200 kgCO₂ por tonelada de carcaça. Já para o abate de bovinos observa-se um valor de emissões médias de GEE de 21,9 kgCO₂ por tonelada de carcaça no Brasil (D'AUREA et al., 2021).

A partir de dados do IBGE (2021) observa-se um valor de peso médio das carcaças bovinas de 269,6 kg por cabeça e aproximadamente 89 kg para as carcaças bovinas por cabeça. Este valor considerado neste estudo permite obter um abatimento de aproximadamente 107 kgCO₂ por tonelada de carcaça para bovinos e, 194,8 kgCO₂ por tonelada de carcaça para os suínos. Em ambos os casos, se considerarmos apenas o processo de abatedouro, através do armazenamento e queima do biogás existe um abatimento significativo relacionado a não emissão de GEE.

Obviamente, verificou-se nos estudos varrições de peso por cabeça animal. Então, para efeito de comparação, D'Aurea et al. realizou os estudos considerando cada cabeça de bovino com massa de 700 kg. Assim, a partir deste estudo, o abatimento com sistemas de biodigestores seria de 30,93 kgCO₂ por tonelada de carcaça bovina e o estudo realizado por Cherubini et al. (2015) apresentou um peso animal relativo a carcaça de 92,38 kg, próximo de 89 kg.

A produção potencial de metano a partir de biodigestores de abatedouros é de 334.530,4 Nm³/d ou 122.103.602,5 Nm³/ano que corresponde a aproximadamente 187.851.696 Nm³ de biogás (Figura 33).

Figura 33- Produção de biogás a partir dos SV produzidos por estado no Brasil

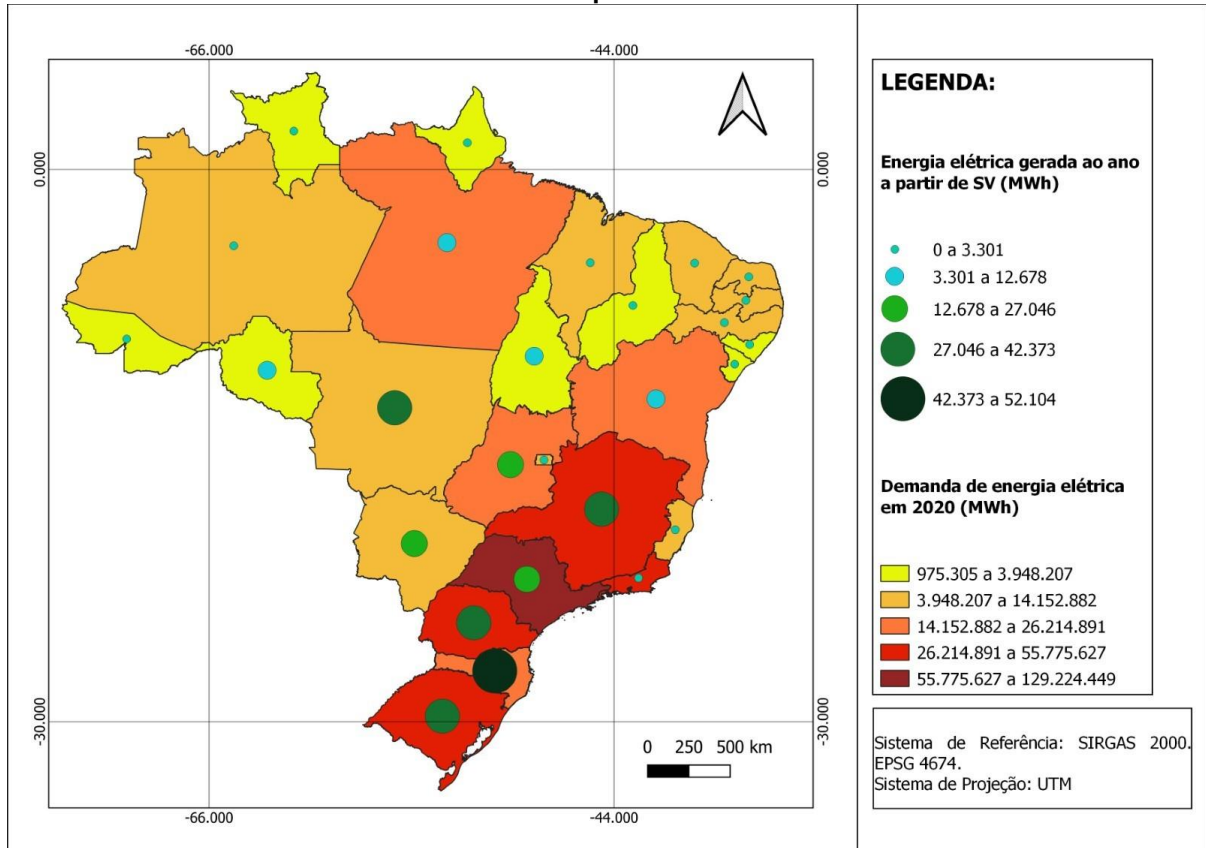


Fonte: Autoria própria (2022)

Os estados do PR, SC, MT e MG possuem produção potencial de metano a partir de abatedouros de suínos e bovinos de 41.922 Nm³/d, 51.548 Nm³/d, 38.725 Nm³/d e 35.500 Nm³/d, respectivamente.

A energia elétrica potencial que pode ser gerada a partir dos abatedouros de suínos e bovinos ao ano é de 338.133 MWh ano (vide Figura 34).

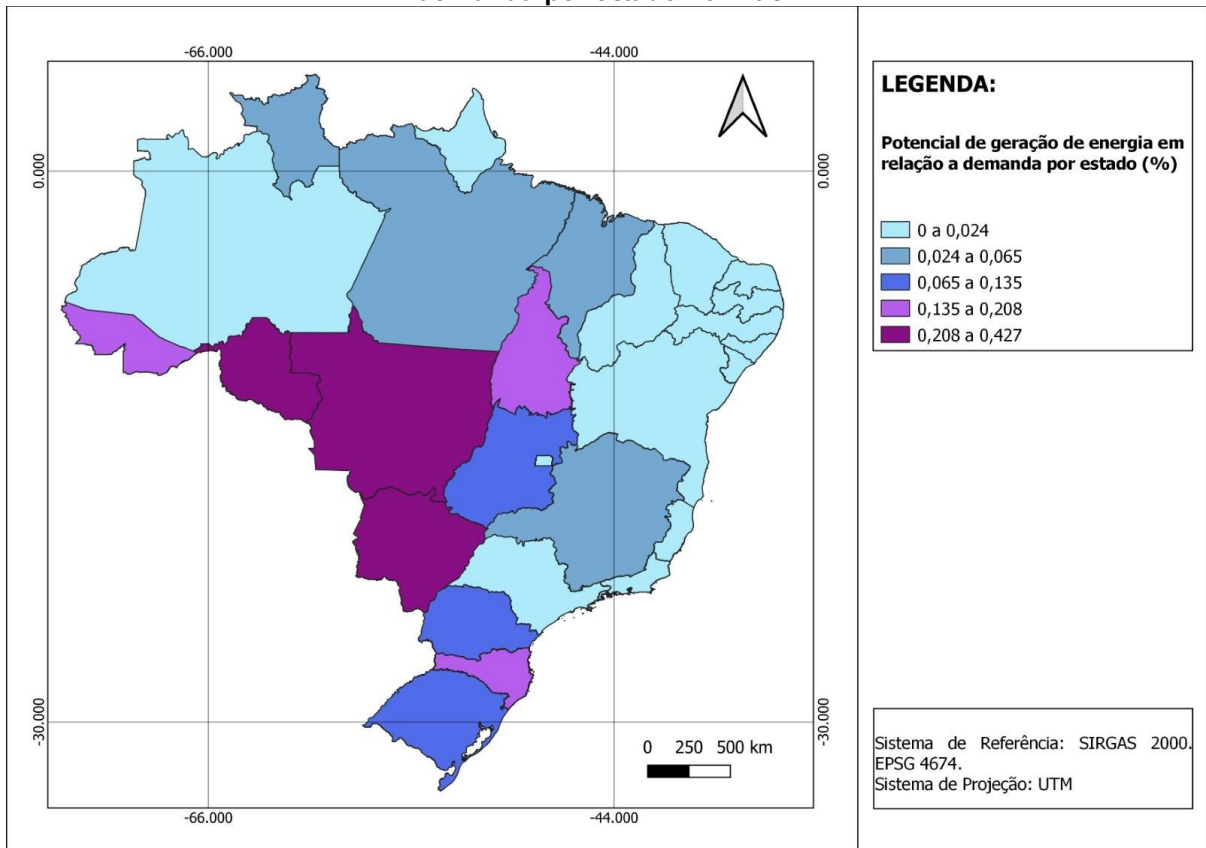
Figura 34- Relação da demanda e geração de energia elétrica a partir do número de abate de suínos e bovinos por estado no Brasil



Fonte: Autoria própria (2022)

O estado de SC que possui o maior potencial de geração de energia a partir do biogás de abatedouros de suínos e bovinos pode gerar cerca de 52.103 MWh/ano. O estado possui uma demanda de 26,21 milhões de MWh/ano. Isto corresponde ao atendimento de demanda de aproximadamente 0,2% (vide a Figura 35).

Figura 35- Potencial de geração de energia a partir do abate de suínos e bovinos em relação a demanda por estado no Brasil



Fonte: Autoria própria (2022)

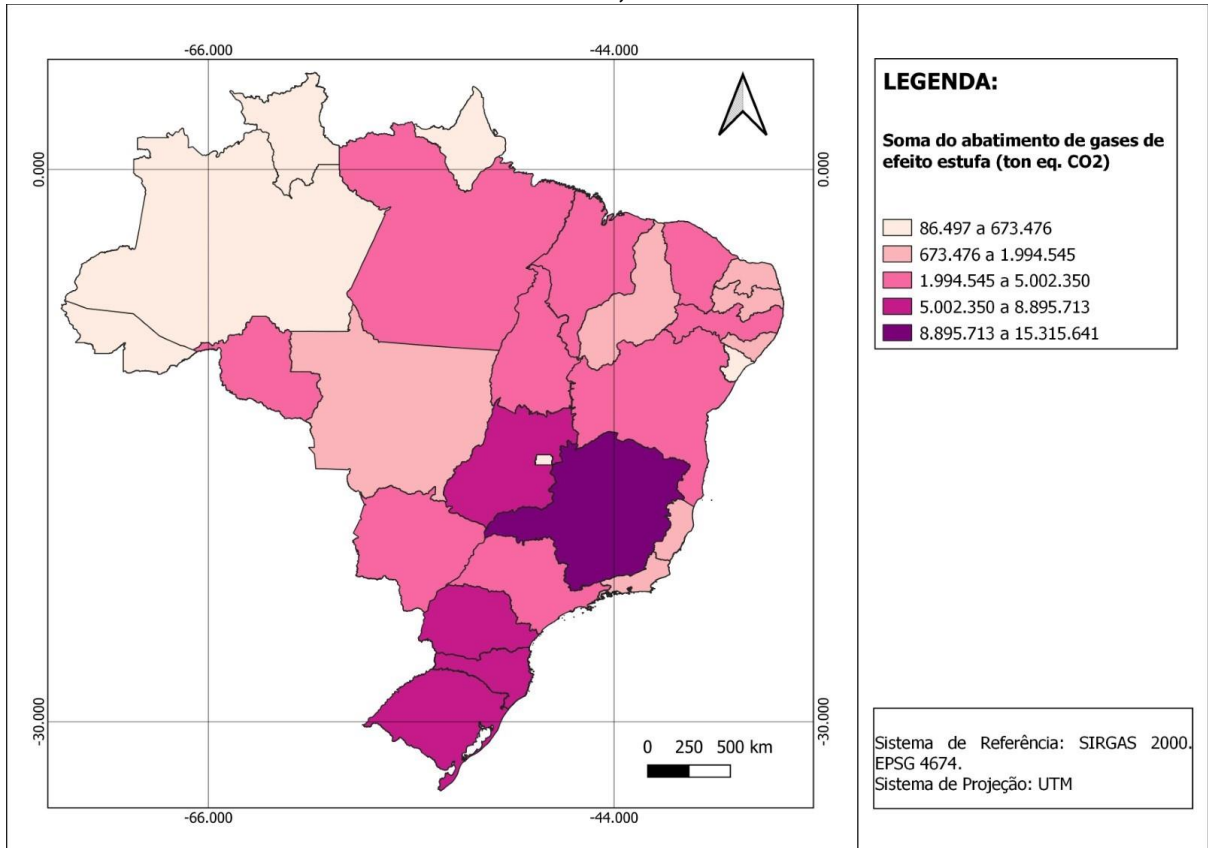
O Brasil possui a média de 0,096% de potencial de geração de energia por estado a partir dos abatedouros de suínos e bovinos. Os estados do MS, MT e RO apresentam os maiores potenciais de geração de energia em relação a demanda por estado, com 0,43%, 0,40% e 0,37%, respectivamente.

Exceto os estados não contabilizados, o RJ possui o menor potencial de geração de energia em relação a demanda por estado, apenas 0,004%, seguido do estado da PB, com 0,006%.

4.4 Soma dos mapas

A cadeia agroindustrial no Brasil que envolve a suinocultura, bovinocultura de leite e os abatedouros de aves, suínos e bovinos apresentou como potencial de abatimento de GEE um valor anual de 86.471.270 tonCO_{2eq} que correspondem a 6,91% das emissões nacionais catalogadas pelo Relatório Anual do Programa Brasileiro GHG Protocol (2022). O estado de MG apresenta o maior potencial de abatimento de GEE através do uso de biodigestores com o valor de 15.315.641 tonCO_{2eq}. (Figura 36).

Figura 36- Abatimento anual de gases de efeito estufa a partir do número de suínos, bovinos, abatedouro de aves, suínos e bovinos



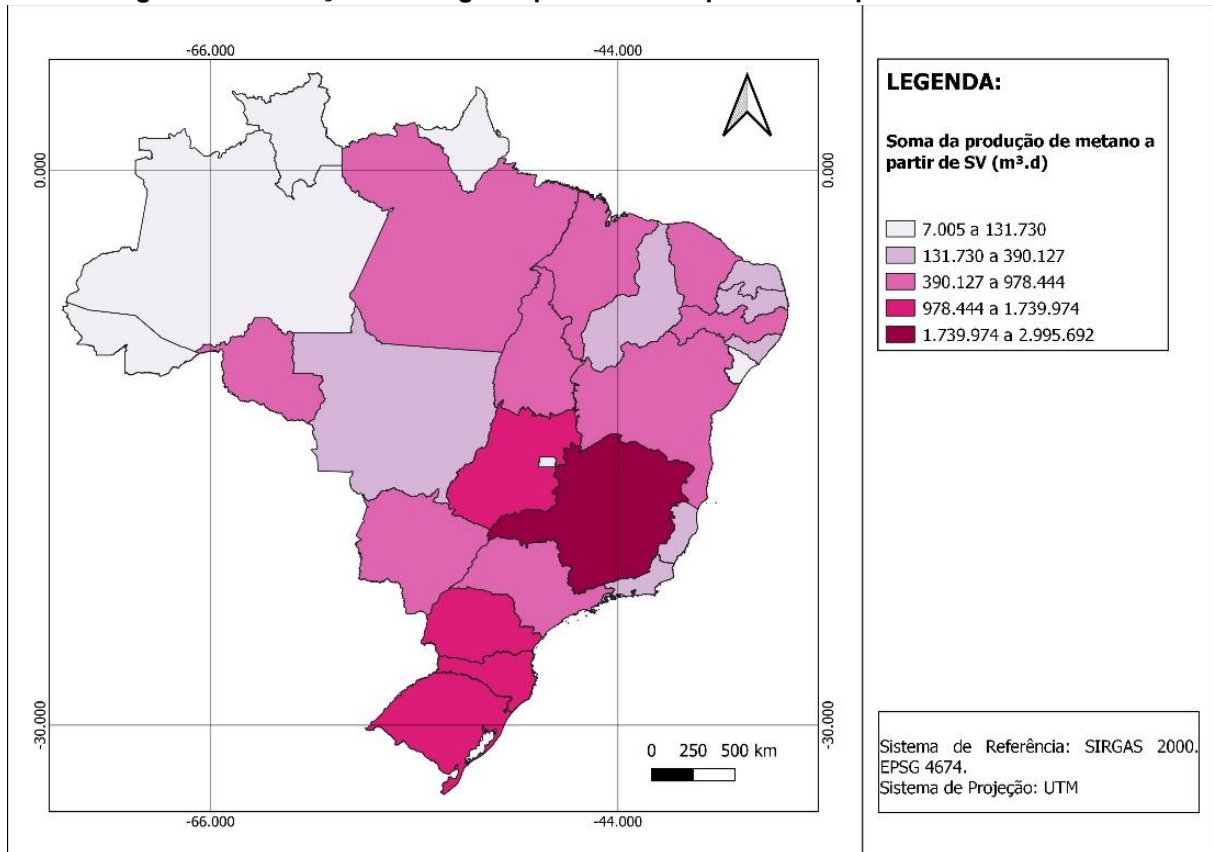
Fonte: Autoria própria (2022)

Os estados do PR, GO, RS e SC apresentam resultados significativos em relação ao abatimento de GEE, com aproximadamente 8,90 milhões, 8,67 milhões, 7,56 milhões e 7,15 milhões de tonCO₂eq. anual.

Para o Brasil, neste estudo, a relação de gás de efeito estufa produzido a partir da geração de biogás por energia potencial foi de 0,4015 ton CO₂.MWh⁻¹, considerando-se apenas a queima do biogás em sistemas de motogerador.

O Brasil possui o potencial de geração de metano de 16.913.514 Nm³.d na cadeia da suinocultura e bovinocultura associada aos abatedouros avícolas, de suínos e de bovinos. Este valor corresponde a aproximadamente 15.222 TEP/d, que corresponde a cerca de 2 vezes a energia utilizada a partir do biogás no país em 2020 (BEN, 2022). O estado de MG apresenta o maior potencial de geração de biogás a partir de SV, cerca de 2,99 milhões Nm³.d e o estado do AP apresenta o menor potencial de aproximadamente 7.000 Nm³.d (Figura 37).

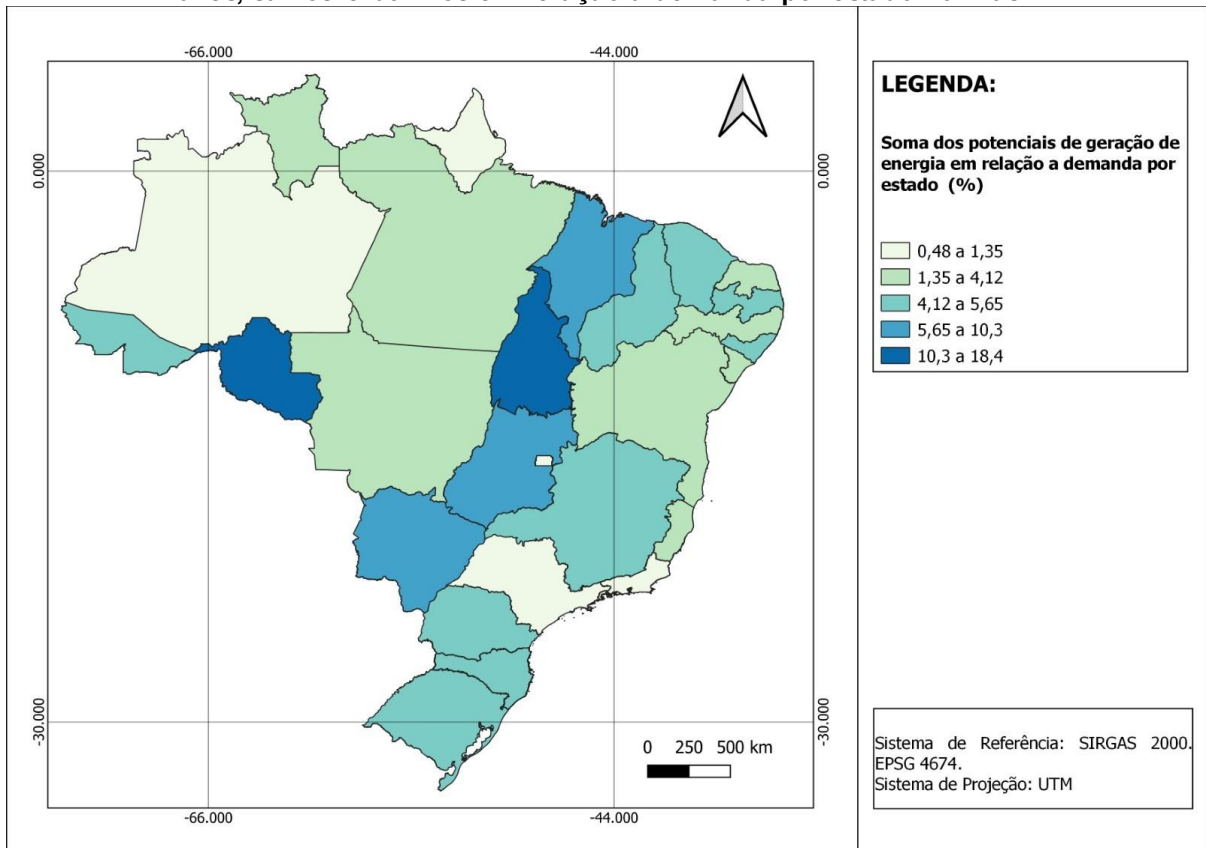
Figura 37- Produção de biogás a partir dos SV produzidos por estado no Brasil



Fonte: Autoria própria (2022)

O Brasil possui a média de 5,1% de potencial de geração de energia por estado para a cadeia agroindustrial estudada. Os estados do TO e RO apresentam os maiores potenciais de geração de energia em relação a demanda por estado, com 18,4% e 17,53%. O DF e AP possuem os menores potenciais de geração de energia em relação a demanda por estado, com apenas 0,48% e 0,69% (Figura 38).

Figura 38- Potencial de geração de energia a partir do número de suínos, bovinos, abate de aves, suínos e bovinos em relação a demanda por estado no Brasil



Fonte: Autoria própria (2022)

O aproveitamento do biogás na forma de energia elétrica a partir de biodigestores na cadeia agroindustrial estudada poderia elevar a participação do biogás no uso de fontes renováveis de energia. No ano de 2021 a energia a partir do biogás teve um crescimento de 20,9%.

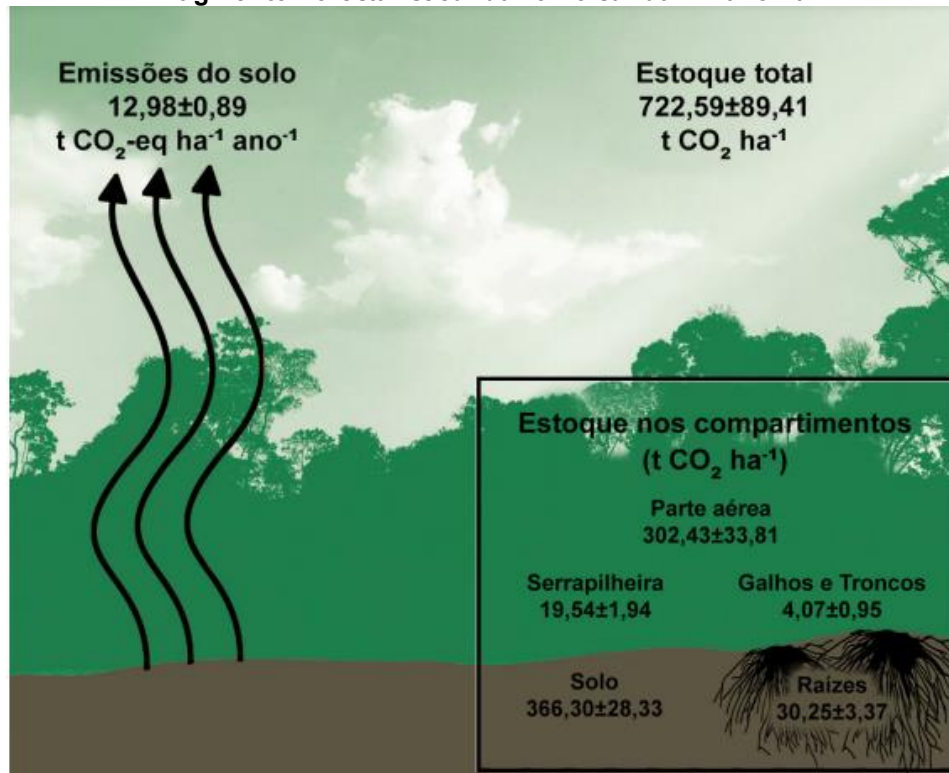
4.5 Gases de Efeito Estufa

4.5.1 Área florestal

A quantificação dos estoques de carbono (C) e emissões de gases de efeito estufa (GEE) contribui para o entendimento da dinâmica de troca do C e do N entre floresta e atmosfera. Ao longo dos anos, ocorre a remoção de C da atmosfera e sua alocação e armazenamento nos diversos compartimentos florestais (NASCIMENTO et al., 2021).

Os compartimentos que armazenam C na floresta são: biomassa aérea; biomassa de raiz; troncos e galhos mortos; serrapilheira; matéria orgânica estável distribuída no perfil do solo (Figura 39).

Figura 39- Emissões de GEE do solo (CO₂eq) e estoques de C (CO₂eq) de compartimentos do fragmento florestal secundário no sul da Amazônia



Fonte: Nascimento et al. (2021)

O compartimento solo e parte aérea da floresta, contribuíram, respectivamente, com cerca de 50% e 41% do estoque total de C. As raízes contribuíram com 4,2%, galhos e troncos com 0,6 % e a serrapilheira com 2,7% (NASCIMENTO et al., 2021).

O Brasil apresenta um potencial de abatimento de 86,5 milhões de ton. CO₂eq ao ano na cadeia agropecuária da suinocultura, bovinocultura e abatedouros. Isto representa em termo teóricos ao armazenamento de carbono vegetal de aproximadamente 26,57 milhões de toneladas de carbono vegetal.

De acordo com Manfrinato, Vidal e Brancalion (2018), uma tonelada de Carbono estocado no meio florestal equivale a 3,7 toneladas de CO₂eq sequestrado da atmosfera.

Uma árvore, em média, tem capacidade para armazenar 15,6 quilos de CO₂ por ano (ESALQ, 2023). Ou seja, os GEE de abatimento deste estudo seriam equivalentes a 554,5 milhões de árvores de reflorestamento.

O quadro 2 possui valores correspondentes a árvores de biomas do Brasil correspondentes ao abatimento de CO₂eq, obtido neste estudo.

Quadro 2- Gases de efeito estufa evitados em formas correspondentes de biomassa

Bioma	Sistema florestal	Estoque biomassa (t/ha)	CO ₂ evitado em correspondência de área (ha)	Autores
Cerrado	Agroflorestal regenerativo análogo	49,61	471243,3	Adaptado Torres (2015)
	Agroflorestal com árvores e culturas perenes	61,61	379457,5	Adaptado Torres (2015)
	Silvipastoris e agrissilvipastoris	68,62	340693,4	Adaptado Torres (2015)
	Típico	31	754141,2	Adaptado Pereira et al. (2018)
Mata Atlântica	Típico	125	187027	MCTI (2020)
Floresta Amazônica	Típico	121	193209,7	MCTI (2020)

Fonte: Autoria própria (2022)

A área ocupada pela bovinocultura de leite, principalmente em criações semi-intensivas, poderia ser compensada pelo abatimento de CO₂eq. da queima do biogás em sistemas de biodigestores. As áreas ocupadas pela suinocultura e pelos abatedouros, também poderiam ser objeto de compensação a partir da instalação de biodigestores.

Atualmente, existe a necessidade de realizar a descarbonização dos sistemas produtivos agropecuários e industriais que passa pela adoção de práticas de aumento da eficiência energética nos sistemas produtivos e a integração com sistemas agroflorestais visando mitigar os impactos das mudanças climáticas e a construção de um sistema agropecuário sustentável.

4.6 Contexto atual do uso de biogás

A COP 27 é a 27ª edição da Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), que ocorre anualmente desde 1995. A última conferência foi realizada em novembro de 2022 na cidade de Sharm El-Sheikh, no Egito.

O documento "Sharm el-Sheikh Implementation Plan" aborda diversas discussões sobre as crises globais interconectadas relacionadas à mudança climática e à perda de biodiversidade, a fim de alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Destaca-se a importância vital de proteger, conservar, restaurar e usar de forma sustentável a natureza e os ecossistemas para a ação climática sustentável. Além disso, o documento alerta que os desafios socioeconômicos

relacionados à recuperação pós-pandemia de coronavírus não devem ser usados como pretexto para retroceder ou desvalorizar a ação climática.

No que diz respeito à energia, destaca-se a importância de fortalecer uma variedade de fontes de energia limpa, incluindo opções de baixa emissão e energias renováveis, em todos os níveis, a fim de diversificar os sistemas e as fontes de energia, levando em consideração as circunstâncias nacionais e reconhecendo a necessidade de apoio para transições nos processos produtivos. Pois limitar o aquecimento global a 1,5 °C requer uma rápida, profunda e sustentada redução de 43% nas emissões globais de gases de efeito estufa até 2030.

Além disso, as emissões de gases de efeito estufa, incluindo metano, necessitam do desenvolvimento, implantação e disseminação de tecnologias e a adoção de políticas para a transição de energia de baixa emissão de GEE, inclusive ampliando rapidamente a implantação de geração de energia limpa e medidas de eficiência energética. Isto inclui a redução e a eliminação gradual de combustíveis fósseis.

Neste contexto, aumentar a participação do uso de biogás no cenário nacional como fonte renovável está de acordo com as políticas preconizadas na COP 27 em consonância com a redução de GEE da cadeia agropecuária brasileira.

Desta forma, existe a necessidade de reduzir a vulnerabilidade às mudanças climáticas de maneira a inserir tecnologias e capacitar fontes estacionárias locais interligadas a rede elétrica na forma de Geração Distribuída, de forma a conservar e proteger os Recursos Hídricos e os ecossistemas aquático.

No Brasil, 44,7% da matriz energética é composta por fontes renováveis, sendo as principais o bagaço de cana (16,4%); a energia hidráulica (11%) e lenha e carvão (8,7%). O Biogás possui apenas 0,12% de participação da matriz energética (BEN, 2022).

No ano de 2021, o biogás representou uma participação na matriz renovável de 376.10^3 tonelada equivalente de petróleo ou 4.372,88 GW.h (BEN, 2022). A partir dos cálculos realizados no presente trabalho, o potencial de geração de eletricidade a partir da geração de metano oriundo do número de suínos, bovinos, abate de aves, suínos e bovinos no Brasil é de 17.095.659,58 MW.h ou 17.095,66 GWh, apresentando um potencial de quase quadruplicar a participação atual na matriz energética brasileira.

Pelkmans (2021) afirma que países com baixa densidade populacional tendem a ter um grande potencial para utilização de biomassa como fonte de energia proporcionando uma maior confiabilidade ao sistema de distribuição de energia elétrica. Desta forma, muitos países Europeus tem produzido a chamada bioeletricidade a partir do biogás, tais como a Alemanha, Itália, Croácia e a Suíça.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, foi investigado o potencial energético do biogás e o seu impacto na redução das emissões de gases de efeito estufa. Isso foi realizado por meio do levantamento de dados reais e bibliográficos sobre a geração de resíduos, bem como pela sua utilização como fonte orgânica para a produção de biogás.

Assim, os resultados indicam que o Brasil possui um grande potencial para a produção de biogás a partir dos resíduos gerados na criação e abate de suínos, bovinos e aves, podendo quadruplicar a sua participação e implementação na matriz energética brasileira como fonte de energia elétrica.

Ao aumentar a geração e utilização do biogás, é possível reduzir a dependência de fontes fósseis e, conseqüentemente, diminuir as emissões de gases de efeito estufa. Com base nos resultados alcançados, o Brasil apresenta um potencial significativo de redução das emissões de GEE, ou seja, 86,5 milhões de toneladas de CO_{2eq} podem ser evitadas de serem lançadas na atmosfera a cada ano.

O uso do biogás como fonte de energia renovável está alinhado com os objetivos apresentados na COP 27, que propõe a transição de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis para a implantação de fontes limpas e de baixa emissão, com o objetivo de reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa, incluindo o gás metano.

É evidente que, para alcançar os objetivos e impulsionar o aproveitamento do biogás no Brasil, o qual ainda é bastante reduzido em relação ao seu potencial, torna-se necessário estabelecer políticas e programas de incentivo que possam viabilizar a construção de biodigestores nas propriedades rurais e processos industriais, além da disponibilização de suporte técnico para auxiliar na adoção dessas tecnologias.

REFERÊNCIAS

- ABALDE, A. R.; FLOTATS, X.; FERNANDEZ, B. Optimization of the anaerobic co-digestion of pasteurized slaughterhouse waste, pig slurry and glycerine. **Waste Management**, 2016.
- ABDALLAA, K.Z.; HAMMAMB, G. Correlation between Biochemical Oxygen Demand and Chemical Oxygen Demand for Various Wastewater Treatment Plants in Egypt to Obtain the Biodegradability Indices. **International Journal of Sciences: Basic and Applied Research**, v.13, n.1, p. 42, 2014
- ABPA (Associação Brasileira de Proteína Animal). **Relatório Anual 2021**. São Paulo: ABPA, p. 146, 2021.
- ALVES, R. G. C. de M. **Tratamento e valorização de dejetos da suinocultura através de processos anaeróbios – operação e avaliação de diversos reatores em escala real**. Tese (doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, 172 p. UFSC, Florianópolis, 2007.
- ALVES JUNIOR, J. C. **Estimativa da produção de biogás a partir de dejetos suínos: Avaliação e comparação entre metodologias, aplicadas a um estudo de caso**. 2019. 36 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia de Energia – Universidade Federal da Integração Latino Americana, Foz do Iguaçu, 2019.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução normativa ANEEL nº482 de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 20 de dez de 2022.
- ARAUJO, T. M. S. **Codigestão anaeróbia do lodo fresco do flotor e efluente bruto de um abatedouro de aves e potencial da produção de biogás**. Cascavel, p. 73. Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola. 2021.
- BAHRS, E.; ANGENENDT, E. Status quo and perspectives of biogas production for energy and material utilization. **Gcb Bioenergy**, v. 11, n. 1, p. 9-20, 2019.
- BANJA, M.; JEGARD, M.; MOTOLA, V.; SIKKEMA, R. Support for biogas in the EU electricity sector – A comparative analysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 128, p. 105313, 2019.
- BARTOLI, A.; HAMELIN, L.; ROZAKIS, S.; BORZECKA, M.; BRANDÃO, M. Acoplar modelos econômicos e de contabilidade de emissões de GEE para avaliar a sustentabilidade das políticas de biogás. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 106, p. 133-148, 2019.
- BEN. Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: **EPE**, 2022.

BERNARDES, P.A.C.S.; AQUILA, J.; PAMPLONA, E.O.; ROCHA, L.C.S.; ROTELLA JUNIOR, P. Net metering and tax incentives for distributed generation in Brazil: Economic impact analysis for swine biogas. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, 134138, 2022.

BHARATHIRAJA, B.; SUDHARSANAA, T.; BHARGHAVI, A.; JAYAMUTHUNAGAI, J.; PRAVEENKUMAR, R. Biohydrogen and Biogas: An overview on feedstocks and enhancement process. **Fuel**, v. 185, p.810-828, dez. 2016.

BILLOTA, P.; AMARAL, K. J.; KUNZ, A. Práticas apropriadas para adaptação e mitigação das mudanças climáticas. **Ecossocioeconomias: promovendo territórios sustentáveis**, Blumenau, Editora FURB, p. 59-84, 2019.

BONDT, T. N.; PONSIOEN, L.; PUISTER-JANSEN, T.; VELLINGA, D.; URDU, R.M.; ROBBEMOND. Carbon footprint pig production. **Wageningen Economic Research**. Wageningen, p. 58, 2020.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Secretaria de Políticas para a Formação e Ações Estratégicas. Coordenação-Geral do Clima. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil / Brasília: Coordenação-Geral do Clima, 5. Ed, p. 71, 2019.**

BRASIL. **Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm. Acesso em: 12 de jan. de 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 12 de jan. de 2023.

BRASIL. **Decreto N. 87.079, de 2 de abril de 1982.** Aprova as Diretrizes para o Programa de Mobilização Energética. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-87079-2-abril-1982-436644-publicacaooriginal-1-pe.html#:~:text=Racionalizar%20a%20utiliza%C3%A7%C3%A3o%20da%20energia,petr%C3%B3leo%20por%20combust%C3%A0veis%20alternativos%20nacionais>. Acesso em: 20 de set de 2021.

CAMPOS, A. T. Tratamento biológico aeróbio e reciclagem de dejetos de bovinos em sistema intensivo de produção de leite. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 2, p. 426-438, mar./abr, 2002.

CAPELA, M. V.; CAPELA, J.M.V. Elaboração de gráficos box-plot em planilhas de cálculo. In: **Congresso de matemática aplicada e computacional da região Sudeste–CNMAC Sudeste**. 2011.

CEBULA, J.; CHYGRYN, O.; CHAYEN, S. V.; PIMONENKO, T. Biogas as an alternative energy source in Ukraine and Israel: Current issues and benefits.

International Journal of Environmental Technology and Management, v. 21, n. 5-6, p. 421-438, 2018.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). **Manual do usuário do programa de computador Biogás: geração e uso energético - efluentes e resíduo rural - versão 1.0**. Secretaria Do Meio Ambiente, Ministério Da Ciência e Tecnologia. CETESB: São Paulo, p. 1–61, 2006.

CHAE, K. J.; JANG, A; YIM, S. K.; KIM, I. S. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. **Bioresource Technology**, v; 99, p. 1–6, 2008.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agricultural Wastes**, v; 08, n. 02, p. 65–81, 1983.

CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 1997, 245 p.

CHERNICHARO, C. A. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2 ed.; p. 379, 2016.

CHERUBINI, E.; ZANGHELINI, G. M.; ALVARENGA, R. A. F.; FRANCO, D., SOARES, S. R. Life cycle assessment of swine production in Brazil: a comparison of four manure management systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 68-77, 2015.

CHIUMENTI, A.; DA BORSO, F.; GUERCINI, S.; PEZZUOLO, A.; ZANOTTO, M.; SGORLON, S.; DELLE, Vedove G.; MICELI, F.; STEFANON, B. (2019). The impact of the dairy cow diet on anaerobic digestion of manure. **Annual International Meeting Sponsored, ASABE**, 2019.

CIBIOGÁS (Centro Internacional de Energias Renováveis). Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro. **Biogas**. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/biogas-nobrasil-historia-e-perspectiva-de-futuro>. Acesso em: 2 out. 2021.

CIBIOGÁS (Centro Internacional de Energias Renováveis). Panorama do Biogás no Brasil em 2021. **Biogas Map**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojODc2NTlhOGltOTc2Ny00ZDc1LWl5MTMtYjYwZTRlYjFiOWQ3liwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>. Acesso em: 07 de jan de 2023.

CIEMAT (Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas). **The Biomass Energy Source and Products for Agriculture and Industry**. CIEMAT: Madrid, Spain, 1995.

CIBIOGÁS ENERGIAS RENOVÁVEIS. Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro. [201?]. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/biogas-nobrasil-historia-e-perspectiva-de-futuro>. Acesso em: 2 out. 2021.

COMBATT, M. P. M. **Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves**. Minas Gerais, p.70. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos. 2014.

- COSMANN, N. J. **Tratamento anaeróbio de efluente de abatedouro de aves utilizando surfactina produzida em manipueira**. Cascavel, p. 131. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual do Oeste do Paraná- Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Programa de Pós- Graduação *stricto sensu*. 2015.
- COSTA, J. C. **Uso do coagulante orgânico Tanino no tratamento de efluente de abatedouro avícola**. Paraná, p. 30. TCC (Graduação)- Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2016.
- D'AQUINO, C.A.; MELLO, T.C.; COSTA JUNIOR, L. Efeito da variação da carga orgânica volumétrica natural na produção de biogás a partir de dejetos suíno em diferentes tempos de retenção hidráulica. **Engenharia Sanitária Ambiental**, vol. 24, n. 3, mai./jun., 2019.
- D'AUREA, A.P.; DA SILVA CARDOSO, A.; GUIMARÃES, Y.S.R.; FERNANDES, L.B.; FERREIRA, L.E.; REIS, R.A. Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle Production in Brazil through Animal Management. **Sustainability**, v. 13, 2021.
- DABABAT, S. S.; SHAHEEN, H. Q. Biogas Production Using Slaughterhouse Wastewater Co-digested with Domestic Sludge. **Journal of Civil Engineering and Construction**, v. 08, n. 01, p. 34-40, 2019.
- DA SILVA, T. S.; DOS SANTOS SILVA, P.A; LEITE, J. M.; FILGUEIRA, N.C.; VARANDA, T.S. Evaluation and treatment of swine effluent -case study in Marabá-Pará. **Brazilian Journal of Business**, v. 1, n. 3, p. 1078-1086, 2019.
- DAVIES, F. D.; STULP, S. Determinações de gás metano (ch4) gerado em estação de tratamento de águas residuárias, com avaliação do poder calorífico para queima em caldeira. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 8, n. 4, 2016.
- DENG, L.; LI, Y.; CHEN, Z.; LIU, G. & YANG, H. Separation of swine slurry into different concentration fractions and its influence on biogas fermentation. **Applied Energy**, v. 114, p. 504–511, 2014.
- DENG, L.; YANG, H.; LIU, G.; ZHENG, D.; CHEN, Z.; LIU, Y.; LEI, Y. Kinetics of temperature effects and its significance to the heating strategy for anaerobic digestion of swine wastewater. **Applied Energy**, v. 134, p. 349–355, 2014.
- DE OLIVEIRA, L. G. S.; NEGRO, S. O. Estruturas contextuais e dinâmica de interação no Sistema Brasileiro de Inovação em Biogás. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 107, p. 462-481, 2019.
- DEVI, M. K.; MANIKANDAN, S.; OVIYAPRIYA M.; SELVARAJ M.; ASSIRI M. A.; VICKRAM S.; SUBBAYA R.; KARMEGAM N.; RAVINDRAN B.; CHANG S.W.; AWASTHI M. K. Recent advances in biogas production using Agro-Industrial Waste: A comprehensive review outlook of Techno-Economic analysis. **Bioresource Technology**, v. 363, n. 127871, ISSN 0960-8524, 2022.
- DIMITROV, R.; ZLATEVA, P. Possíveis usos do biogás para fins energéticos. In: **2019 11ª Conferência do Corpo Docente de Engenharia Elétrica (BUEF)**. IEEE, 2019. p. 1-4.

EBPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Desafios para a sustentabilidade ambiental, social e econômica da cadeia produtiva do leite. 1ª ed. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite**, v. 1, p. 101-130, 2012.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Estatísticas do Brasil de Frango de corte 2020/2021. Abates e exportação. **Embrapa Suínos e Aves**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas/frangos/brasil>. Acesso em: 20 de nov de 2022.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Embrapa Suínos e Aves**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/biogasfert/gee/gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 02 de jan de 2023.

ENDLER, I. A. **Avaliação da produção de biogás a partir de resíduo sólido orgânico da indústria cervejeira**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2021.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 /Empresa de Pesquisa Energética.- Rio de Janeiro: **EPE**, p. 292, 2021.

ESALQ (Escola Superior de Agricultura). Neutralização de Carbono por meio do plantio de mudas. **ESALQ Júnior Florestal**. Disponível em: <https://www.esalqirflorestal.org.br/post/neutraliza%C3%A7%C3%A3o-de-carbono>. Acesso em: 13 de jan de 2023.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Report: Greenhouse gas emissions from the dairy sector a life cycle assessment. **Animal Production and Health Division**, p. 98, 2010.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Dairy and dairy products. Agricultural outlook 2022-2031. **Chapter**, v. 07, p. 12, 2022.

FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente). **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria**. Belo Horizonte, p.111, 2015.

FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler/RS). **Critérios técnicos para o licenciamento ambiental de novos empreendimentos destinados à suinocultura**. FEPAM, 2012.

FERREIRA, L.R.A.; OTTO, R.B.; SILVA, F.P.; DE SOUZA, S.N.M; DE SOUZA, S.S.; ANDO JUNIOR, O.H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generations in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440-455, 2018.

FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos). Relatório de Projeto de geração distribuída a partir da biomassa agroindustrial. Praia do Flamengo 200, 1º andar CEP: 22210-901 Rio de Janeiro, **FINEP**, 2010.

FREGUE, R. T. T.; WACHTER, A. R.; IONEL, I.; VINTILA, T.; JULEAN, C.; MOISA, S.; UNGUREANU, C.; MATIUTI, A. C. Renewable Energy Production Potential by using from Wastes Generated in a Pigs Farm and Slaughterhouse. **Revista de Chimie (Bucareste)**, v. 70, n. 06, 2019.

FREITAS, F. F.; DE SOUZA, S.S.; FERREIRA, L.R.A.; OTTO, R.B.; ALESSIO, F.J.; DE SOUZA, S.N.M.; VENTURINI, O.J.; ANDO JUNIOR, O.H. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146-157, 2019.

GALVAN, M. J.; DEGANI, S.; CAGNOLO, M.; BECKER, A.; HILBERT, J.; FUENTES, M.; ACEVEDO, D. Batch optimization of biogas yield from pasteurized slaughterhouse by-products incorporating residues from corn sieving. **Biomass and Bioenergy**, v. 151, 2021.

GBA (German Biogas Association). **Biogas market data in Germany**. Disponível em: [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/18-07-05_Biogasindustryfigures-2017-2018_english.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/18-07-05_Biogasindustryfigures-2017-2018_english.pdf). 2018. Acesso em: 02 de jan de 2022.

GERARDI, M. The microbiology of anaerobic digesters. New York: **Wiley Interscience**, 2003.

GOMES, A. C. A.; PIACENTI, C. A. A Viabilidade Econômico-Financeira do Biogás para Uso Veicular na Região de Toledo, Paraná. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, v. 37, n. 130, p. 83-97, 2016.

GRANDO, R. L. **Mapeamento tecnológico da cadeia produtiva do biogás**. Rio de Janeiro, p. 227. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. 2017.

HAACK, S. C. **Análise técnica e econômica para aproveitamento dos dejetos de caprinos em biodigestores no semiárido baiano**. 215p. Dissertação de Mestrado em Economia. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

HAKAWATI, R.; SMYTH, B. M.; MCCULLOUGH, G.; DE ROSA, F.; ROONEY, D. Qual é a rota mais eficiente em termos de energia para a utilização do biogás: calor, eletricidade ou transporte ?. **Energia Aplicada**, v. 206, p. 1076-1087, 2017.

HENN, A. **Avaliação de dois sistemas de manejo de dejetos em uma pequena propriedade produtora de suínos – condições de partida**. 157 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

HERNÁNDEZ-CHOVER, V.; BELLVER-DOMINGO, A.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F. Efficiency of wastewater treatment facilities: The influence of scale economies. **Journal of Environmental Management**, v. 228, p. 77-84, 2018.

HERNÁNDEZ, S. C.; JIMÉNEZ, L. D.; GARCIA, J. A. B. Potencial de produção de energia a partir de águas residuais de matadouros. **Interciência**, v. 43, n. 8, p. 558-565, 2018.

HOCQUETTE, J. F.; OURY, M. P. L.; LHERM, M.; PINEAU, C.; DEBLITZ, C.; FARMER, L. Situação atual e perspectivas futuras para a produção de carne bovina na Europa – Uma revisão. **Jornal asiático-australiano de ciências animais**, v. 31, n. 7, p. 1017, 2018.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Tabela 6 - Produção de origem animal do Brasil, das Grandes Regiões e das Unidades da Federação, segundo o tipo de produto de origem animal. **Produção pecuária municipal 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Tabela 7- Produção de origem animal, por tipo de produto, segundo o Brasil, as Grandes Regiões e as Unidades da Federação. **Produção pecuária municipal 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Estatística de Produção Pecuária out-dez 2020. **Indicadores IBGE**, p. 85, març. 2021.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Em 2020, cresce o abate de suínos e frangos e cai o de bovinos. **Agência IBGE Notícia**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/30316-em-2020-cresce-o-abate-de-suinos-e-frangos-e-cai-o-de-bovinos>. Acesso em: 12 out. 2022.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Estatística da Produção Agropecuária. **Indicadores IBGE**. Rio de Janeiro: IBGE, p. 51, 2022.

IGLIŃSKI, B.; BUCZKOWSKI, R.; CICHOSZ, M. Produção de biogás na Polônia - Estado atual, potencial e perspectivas. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, v. 50, p. 686-695, 2015.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Emissions from Livestock and manure management. **IPCC Guidelines for National greenhouse gas inventories**. Hongmin Dong, p. 10.1 - 10.87, 2006.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. **CHAPTER 10: Emissions from Livestock and Manure Management**, p. 209, 2019.

JESUS, J. A. **Diagnóstico e proposição de melhorias no sistema de tratamento de efluentes de um abatedouro e frigorífico de aves**. Medianeira, p. 88. TCC (Graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de Engenharia Ambiental. 2018.

JOHNS, M. R.. Developments in wastewater treatment in the meat processing industry: a review. **Bioresource Technology**, v. 54, p. 203-216, 1995.

KADAM, R.; PANWAR, N. L. Recent advancement in biogas enrichment and its applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 892-903, 2017.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. L.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Editora da Univates, 2014.

KAZMIERCZAK, T.; HOSSA, C. L.; MACCAGNAN, B. E.; COLLET, E. B. Estimativa teórica da produção de biogás a partir de efluente procedente de abatedouro de

suínos e aves no município de Videira - sc (estudo de caso). **Ignis (Caçador)**, v. 05, n. 01, p. 05-17, 2016.

KOSTANESKI, P. C. **Comparação da eficiência de lagoas de estabilização e biodigestores no manejo e tratamento de dejetos em empreendimentos da suinocultura no município de Toledo-PR**. Cascavel, p. 100. Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-Graduação Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura. 2018.

LEITÃO, F. O; SILVA, W. H. Geração de energia e renda a partir do tratamento dos resíduos da suinocultura. **Informe GEPEC**, v. 22, n. 1, p. 116-132, 2018.

LIMA, D. A. A. **Avaliação da biodegradação anaeróbia de efluente de abatedouro de aves**. Recife, p. 114. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências . Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2010.

LIMA, C. A. **Reator UASB seguido de filtro anaeróbio para o tratamento de águas residuárias de abatedouro avícola pré acidificadas**. Minas Gerais, p.112. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Veterinária. 2014.

LIMA, R. M.; SANTOS, A. H.M; PEREIRA, C. R. S.; FLAUZINO, B. K.; PEREIRA, A. C. O. S.; NOGUEIRA, F. J. H.; VALVERDE, J. A. R. Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil. **Waste Management**, v. 74, p. 323-334, 2017.

LIMA, N.D.D.S.; NÄÄS, I.D.A.; GARCIA, R.G.; DE MOURA, D.J. Environmental impact of Brazilian broiler production process: Evaluation using life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, p. 237, 2019.

LINZ, M. A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C.; KUNZ, A. Biogas yield and productiveness of swine manure for different reactor configurations. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 6, p. 664-673, nov./dec. 2020.

LOPES, L. S.; ROSA, A. P.; MARCO, J. S.; POSSETTI, G. R. C.; MESQUITA, T. C. R. Potencial energético do biogás e lodo de reatores UASB no estado do Paraná, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, 2020.

LOPES, J. O.; ROSA, A. P.; SOUSA, I. P.; OLIVEIRA, N. S.; BORGES, A. C. Mathematical models for estimating methane production in covered lagoon biodigesters treating pig manure. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 04, p. 438-448, 2021.

MACEDO, F. J. **Dimensionamento de biodigestores para tratamento de dejetos da produção suína**. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2013.

MADEIRA, J.G.F.; BOLOY, R.A.M.; DELGADO, A.R.S.; LIMA, F.R.; COUTINHO, E.R.; DE CASTRO PEREIRA FILHO, R. Ecological analysis of hydrogen production via biogas steam reforming from cassava flour processing wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 709-716, 2017.

MANFRINATO, W.; VIDAL, E.; BRANCALION, P. **Como compensar suas emissões no transporte do dia a dia [2018]**. Disponível em: http://esalqlastrop.com.br/downloads/Como_fazer_o_calculo_de_emissoes_-_Versao_1.1_LASTROP-ESALQ.pdf. Acesso em: 13 de jan 2023.

MARCOS, A.D.; AL-KASSIR, A.; CUADROS, F.; YUSAL, T. Treatment of slaughterhouse waste water mixed with serum from lacteal industry of extremadura in Spain to produced clean energy. **Energies**, v. 10, n. 06, p. 765, 2017.

MARTINELLI, G.; VOGEL, E.; DECIAN, M.; FARINHA, M.J.U.S.; BERNARDO, L.V.M.; BORGES, J.A.R.; GIMENES, R.M.T.; GARCIA, R.G.; RUVIARO, C.F. Assessing the eco-efficiency of different poultry production systems: An approach using life cycle assessment and economic value added. **Sustain. Prod. Consum.**, v. 24, p. 181–193, 2020.

MATHIAS, M. C. P. P.; MATHIAS, J. F. C. M. Biogas in Brazil: a governmental agenda. **Journal of Energy and Power Engineering**, v. 9, p. 1-15, 2015.

MATSUMURA, E. M. **Perspectivas para conservação e reúso de água na indústria de alimentos – estudo de uma unidade de processamento de frangos** / E.M. Matsumura. – São Paulo. p. 249 Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2007.

MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação). Quarta comunicação nacional do Brasil à Convenção- Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima. Brasília: **MCTI**, 2020.

MIRANDA, A. P.; JUNIOR, J. D. L.; THOMAZ, M. C.; PEREIRA, G. T.; FUKAYAMA, E. H. Anaerobic biodigestion of pigs feces in the initial, growing and finishing stages fed with diets formulated with corn or sorghum. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.1, p.47-59, jan./fev. 2012.

MURUGAN, S. S.; DEEPAN, P. Validation of Slaughterhouse Wastewater Using Expanded Granular Sludge Bed Reactor. **Emperor Journal of Applied Scientific Research**, v. 02, n. 06, 2020.

MUSA, M. A.; IDRUS, S.; HASFALINA, C. M.; DAUD, N. N. N. Effect of Organic Loading Rate on Anaerobic Digestion Performance of Mesophilic (UASB) Reactor Using Cattle Slaughterhouse Wastewater as Substrate. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, n. 15, 2018.

MUSA, M. A.; IDRUS, S.; HARUN, M. R.; MARZUKI, T. F. T. M.; WAHAB, A. M. A. A Comparative Study of Biogas Production from Cattle Slaughterhouse Wastewater Using Conventional and Modified Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, n.17, v. 283, 2020.

NJOYA, M.; IWA, M. B.; NTWAMPE, S. K. O. Treatment of poultry slaughterhouse wastewater using a down-flow expanded granular bed reactor. **Water Practice & Technology**, v.14, n. 3, 2019.

NSAIR, A.; CINAR, S. O.; ALASSALI, A.; QDAIS, H. A.; KUCHTA, K. Operational Parameters of Biogas Plants: A Review and Evaluation Study. **Energies**, v.13, 2020.

OLIVEIRA, P.A.V, de coord. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA. Documentos 27, p. 188, 1993.

OLIVEIRA, P. A.; HIGARASHI, M.; NUNES, M. L. **Emissão de gases, na suinocultura, que provocam efeito estufa**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, p. 12, 2004.

ORHORHORO, E. K.; EBUNILO, P. O.; SADJERE, G. E. Determinação experimental do efeito de sólidos totais (TS) e sólidos voláteis (VS) na produção de biogás. **American Journal of Modern Energy**, v. 3, n. 6, p. 131-135, 2017.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A., JÚNIOR, J. L. Influência da relação volumoso: concentrado e do tempo de retenção hidráulica sob a biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 03, p. 386-394, maio/jun., 2010.

PARK, S.; LI, Y. Evaluation of methane production and macronutrient degradation in the anaerobic co-digestion of algae biomass residue and lipid waste. **Bioresource technology**, v. 111, p. 42-48, 2012.

PASQUAL, J. C.; BOLLMANN, H. A.; SCOTT, C. Perspectivas do Biogás na Pecuária no Brasil e nos Estados Unidos: Uso de Energia Elétrica, Térmica e Veicular. **Journal of Agricultural Science and Technology A**, v. 7, p. 258-273, 2017.

PBGHG (Programa Brasileiro GHG Protocol). **Relatório Anual do Programa Brasileiro GHG Protocol: resultados ciclo 2022**. São Paulo. Ed. da FGV da EAESP, p. 39, 2022.

PELKMANS, L. EA Bioenergy Countries' Report – update 2021. Implementation of bioenergy in the IEA Bioenergy member countries. **IEA Bioenergy ExCo**, nov., 2021.

PEREIRA, A. M.; DA SILVA, A. E.; FRAGA, J. A.; DE OLIVEIRA ROCHA, W. **Estimativa de biomassa vegetal e sequestro de carbono no parque natural municipal flor do ipê, Várzea Grande-MT**. Mato Grosso. TCC (Graduação) – Centro Universitário de Várzea Grande, Gpa de Ciências Agrárias, Biológicas e Engenharias. Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental. 2018.

PEREIRA, I. Z.; DOS SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; SILVA, H. L. C.; FILHO, G. L. T.; SILVA, A. P. M. Energia do biogás da vinhaça e análise econômica no estado de São Paulo, Brasil. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121018, 2020.

PERGHER, M.; DIECKOW, J.; PIVA, J. T.; BAYER, C.; VELOSO, M. G.; BREVILIERI, R. C. Emissões de óxido nitroso do solo em sistemas integrados de produção com lavoura-pecuária-floresta. In: **Embrapa Florestas-Resumo em anais de congresso (ALICE)**. In: REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, ed. 3, 2013, Londrina. Sistemas conservacionistas de produção e sua interação com a ciência do solo: resumos. Londrina: IAPAR, 2013.

PESSOA, D. R.; COLLA, D. C.; COSTA, B. J. Potential of Alternative Sources for Electric Power Generation in the State of Paraná. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 64, 2021.

PINTO, S. S.; SILVA, C. S. **Estatística: volume I**. Rio Grande do Sul. Ed. da FURG, p. 198, 2020.

PTAK, M.; KOZIOLEK, S.; DERLUKIEWICZ, D.; SLUPINSKI, M.; MYSIOR, M. Analysis of the use of biogas as fuel for internal combustion engines. **Springer International Publishing**, p. 441-450, 2017.

RANZI, T. J. D.; ANDRADE, M. A. N.. **Estudo de viabilidade de transformação de esterqueiras e bioesterqueiras para dejetos de suínos em biodigestores rurais visando o aproveitamento do biofertilizante e do biogás**. In Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, 2004, Campinas (SP) [online]. 2004.

RODRIGUES, L. S.; SILVA, J. I.; ZOCCATO, M. C. O.; PAPA, D. N.; SPERLING, M. V.; OLIVEIRA, P. R. Avaliação de desempenho de reator UASB no tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n.1, p.94-100, 2010.

ROHSTOFFE, F. N. **Guia prático do biogás: geração e utilização**. Gulzow, 5 ed., p. 236, 2010.

ROTZ, C. A. Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 07, p. 6675-6690, 2018.

SAAD, N. M; MASSÉ, D.I. A start-up of psychrophilic anaerobic sequence batch reactor digesting a 35% total solids feed of dairy manure and wheat straw. **AMB Express**, v.5, n.1, p. 144-154, 2015.

SANCHEZ, Z.; POGGIO, D.; CASTRO, L.; ESCALANTE, H. Simultaneous Synergy in CH₄ Yield and Kinetics: Criteria for Selecting the Best Mixtures during Co-Digestion of Wastewater and Manure from a Bovine Slaughterhouse. **Energies**, v. 14, n. 384, 2021.

SANTOS, J. L. **Revista Avicultura Industrial**, Ed.1080, 2003.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F.. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable energy**, v. 129, p. 457-472, 2018.

SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas). **Mapeamento da suinocultura brasileira**. Associação Brasileira dos Criadores de Suínos.- Brasília, DF, p. 376, 2016.

SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remocões de Gases de Efeito Estufa). **Análise das emissões brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2020**. Brasil: SEEG, p. 55, 2021.

SGORLON, J. G.; RIZK, M. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G. Avaliação da DQO e da relação C/N obtidas no tratamento anaeróbio de resíduos fruti-hortícolas. **Acta Scientiarum Technology**, v. 33, n. 4, p. 421-421, 2011

SHIMAHATA, A., FARGHALI, M., FUJII, M. Factors Influencing the Willingness of Dairy Farmers to Adopt Biogas Plants: A Case Study in Hokkaido, Japan. **Sustainability**, v.12, 2020.

SIGSIF (Sistemas de Informações Gerenciais do Serviço de Inspeção Federal). **Quantidade de abate estadual por ano/espécie em 2020**. Disponível em: https://sigsif.agricultura.gov.br/sigsif_cons!/ap_abate_estaduais_cons?p_select=SIM. Acesso em: 26 de outubro de 2022.

SILVA, W. G. D. **Produção de biogás e biofertilizante a partir da digestão anaeróbia de cama de frango**. 2019. 93 páginas. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Tocantins, 2019.

SILVA, H. L. D. C.; CÓRDOVA, M. E. H.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L., LORA, E. E. S.; SANTOS, A. H. M.; DOS SANTOS, I. F. S.; BOTAN, M. C. C. O.; PEDREIRA, J. R.; FLAUZINO, B. K. Análise econômica e em escala laboratorial da produção de biogás a partir de dejetos suínos. **Energia Renovável**, v. 186, p. 350-365, 2022.

SPEECE, R. E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewater**. Nashville: Archae Press, 1995.

SPERLING, M. V. Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. **IWA**, vol. 1. p. 55, ISBN: 1 84339 161 9, 2007.

STIVAL, L.; ERRERA, M.; AISSE, M. Avaliação do desempenho de uma unidade de biodigestão em escala real tratando dejetos da suinocultura. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 5, p. 983-994, 2017.

STRASSBURG, U.; DE OLIVEIRA, N. M.; DA ROCHA JUNIOR, W. F. As Percepções dos Atores Locais sobre o Biogás no Oeste do Paraná. **Desenvolvimento em Questão**, v. 18, n. 50, 2020.

SUNADA, N. S.; ORRICO, A. C. A.; JUNIOR, M. A. P. O.; JUNIOR, F. M. V.; GARCIA, R. G.; FERNANDES, A. R. M. Potential of biogas and methane production from anaerobic digestion of poultry slaughterhouse effluent. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.41, n.11, p.2379-2383, 2012.

TAVARES, J. M. R. **Modelagem do consumo de água, produção de dejetos e emissão de gases de efeito estufa e amônia na suinocultura**. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2016.

THOMA, G. J.; POPP, J. S.; NUTTER, D. W.; SHONNARD, D. R.; ULRICH, R.; MATLOCK, M. D.; KIM, D.; NEIDERMAN, Z.; KEMPER, N.; EAST, C.; ADOM, F. Greenhouse gas emissions from milk production and consumption in the United States: A cradle-to-grave life cycle assessment circa 2008. **International Dairy Journal**, v. 31, p. S3- S14, 2013.

TORRES, C. M. M. E. **Estocagem de carbono e inventário de gases de efeito estufa em sistemas agroflorestais**. Minas Gerais, p. 82. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, 2015.

UNFCCC (United Nations Framework Convention On Climate Change). **Plano de implementação Sharm el- sheikh, COP 27**. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/624444>. Acesso em: 03 de jan de 2023.

VANOTTI, M. B.; SZOGI, A. A. Water quality improvements of wastewater from confined animal feeding operations after advanced treatment. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.37, p.86-96, 2008.

VARMA, VS; PARAJULI, R.; SCOTT, E.; CANTER, T.; LIM, TT; POPP, J.; THOMA, G. Dairy and swine manure management – Challenges and perspectives for sustainable treatment technology. **Science of The Total Environment**, 778, 146319, 2021.

VERNA, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes**. 2002. 50 f. Dissertação (Master in Earth Resources Engineering) – Columbia University, New York, 2002.

VEUM, T.L.; BOLLINGER, D.W.; BUFF, C.E.; BEDFORD, M.R. A genetically engineered *Escherichia coli* phytase improves nutrient utilization, growth performance and bone strength of young swine fed diets deficient in available phosphorus. **Journal of Animal Science, Champaign**, v.84, n.5, p.1147-1158, 2006.

VIANCELLI, A.; MICHELON, W.; ELMAHDY, M. **Current efforts for the production and use of biogas around the world**. Chapter 13. *In*: Improving Biogas Production, p. 277-287, 2019.

VIEIRA, H. G.; POLLI; H. Q. O biogás como fonte alternativa de energia. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 388-400, 2020.

WACHTER, A. R.; IONEL, I.; VINTILĂ, T.; VAIDA, D. Increasing energy efficiency of an agro-industrial integrated process through anaerobic co-digestion of slaughterhouse waste water and farm manure. *In*: 25^a Conferência e Exposição Europeia de Biomassa, 12-15 de junho de 2017. **Anais [...]** Suécia: Estocolmo, p. 938-942.

XAVIER, C. A. N.; JÚNIOR, J. L. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 02, p. 212-223, mar./abr., 2010.

XIA, Y.; MASSÉ, D. I.; MCALLISTER, T. A.; BEAULIEU, C.; UNGERFELD, E. Anaerobic digestion of chicken feather with swine manure or slaughterhouse sludge for biogas production. **Waste Management**, v. 32, p. 404-409, 2012.

YU, H.; WILSON, F; TAY, J. Kinetic analysis of an anaerobic filter. **Water Research**, v. 32, 1998.

ZAIAT, M. **Desenvolvimento e análise de biorreatores anaeróbios contendo células imobilizadas para tratamento de águas residuárias**. São Carlos, p. 135. Concurso Público (Título de Livre Docência)- Universidade de São Paulo, Departamento de hidráulica e saneamento. Escola de Engenharia de São Paulo. 2003.

APÊNDICE A- Suinocultura

(continua)

Estado	Suínos ciclo completo (baías)	SV (g.L ⁻¹)	B0 (Nm ³ CH ₄ . Kg SV ⁻¹)	Volume da água residuária (L. suíno ⁻¹ .d ⁻¹)	Metano SV (Nm ³ .d)	Eletricidade gerada anualmente (MWh)	Efeito estufa anual (ton eq. CO ₂)	Demanda de consumo de energia 2020 (MWh)	Potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)
AC	160.708	41,1	0,32	6,26	13.228,11	13.370,57	67.629,46	1.102.569,96	1,21
AL	152.679	41,1	0,32	6,26	12.567,24	12.702,58	64.250,68	3.948.207,04	0,32
AP	32.244	41,1	0,32	6,26	2.654,05	2.682,63	13.568,99	1.018.817,94	0,26
AM	81.877	41,1	0,32	6,26	6.739,42	6.812,00	34.455,64	6.208.128,11	0,11
BA	1.078.368	41,1	0,32	6,26	88.762,07	89.717,97	453.800,99	24.825.295,91	0,36
CE	1.208.834	41,1	0,32	6,26	99.500,93	100.572,47	508.703,95	11.947.969,57	0,84
DF	186.698	41,1	0,32	6,26	15.367,39	15.532,89	78.566,63	6.169.523,00	0,25
ES	215.625	41,1	0,32	6,26	17.748,41	17.939,55	90.739,75	9.913.148,44	0,18
GO	1.822.133	41,1	0,32	6,26	149.982,48	151.597,67	766.793,67	16.633.929,66	0,91
MA	1.030.544	41,1	0,32	6,26	84.825,61	85.739,12	433.675,60	7.717.759,00	1,11
MT	2.601.292	41,1	0,32	6,26	214.116,22	216.422,08	1.094.680,93	9.799.972,19	2,21
MS	1.442.689	41,1	0,32	6,26	118.749,88	120.028,72	607.115,28	6.270.798,09	1,91
MG	5.229.317	41,1	0,32	6,26	430.432,86	435.068,29	2.200.611,69	55.775.626,67	0,78
PA	739.062	41,1	0,32	6,26	60.833,29	61.488,42	311.013,56	19.524.675,99	0,31
PB	258.946	41,1	0,32	6,26	21.314,23	21.543,77	108.970,18	5.597.875,67	0,38
PR	6.944.541	41,1	0,32	6,26	571.615,50	577.771,36	2.922.415,70	32.070.416,03	1,80
PE	758.981	41,1	0,32	6,26	62.472,86	6.3145,64	319.395,91	14.152.882,08	0,45
PI	1.055.077	41,1	0,32	6,26	86.844,96	87.780,21	443.999,62	3.699.450,10	2,37
RJ	77.179	41,1	0,32	6,26	6.352,72	6.421,13	32.478,62	38.118.657,22	0,02
RN	291.925	41,1	0,32	6,26	24.028,78	24.287,55	122.848,47	5.638.124,00	0,43
RS	5.859.508	41,1	0,32	6,26	482.304,82	487.498,87	2.465.809,93	29.620.972,48	1,65
RO	163.084	41,1	0,32	6,26	13.423,69	13.568,25	68.629,34	3.387.627,03	0,40
RR	77.825	41,1	0,32	6,26	6.405,89	6.474,88	32.750,47	975.304,76	0,66
SC	7.805.614	41,1	0,32	6,26	642.491,70	649.410,84	3.284.774,17	26.214.890,79	2,48

(conclusão)									
Estado	Suínos ciclo completo (bacias)	SV (g.L ⁻¹)	B0 (Nm ³ CH ₄ . Kg SV ⁻¹)	Volume da água residuária (L. suíno ⁻¹ .d ⁻¹)	Metano SV (Nm ³ .d)	Eletricidade gerada anualmente (MWh)	Efeito estufa anual (ton eq. CO ₂)	Demanda de consumo de energia 2020 (MWh)	Potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)
SP	1.516.636	41,1	0,32	6,26	124.836,57	126.180,96	638.233,81	129.224.449,33	0,10
SE	89.558	41,1	0,32	6,26	7.371,65	7.451,04	37.687,98	3.630.194,63	0,21
TO	243.289	41,1	0,32	6,26	20.025,48	20.241,14	102.381,37	2.453.201,22	0,83

Fonte: Autoria própria (2022)

APÊNDICE B- Bovinocultura

(continua)

Estado	Vacas leiteiras	SV (g.L ⁻¹)	B0 (Nm ³ CH ₄ . Kg SV ⁻¹)	Volume da água residual (L. bovino ⁻¹ .d ⁻¹)	Metano SV (Nm ³ .d)	Eletricidade gerada anualmente (MWh)	Efeito estufa anual (ton eq. CO ₂)	Energia térmica (MJ/d)	Demanda de consumo de energia 2020 (MWh)	Potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)
AC	56.502	82,96	0,22	44,2	45.580,34	46.071,20	233.031,97	984.535,24	1.102.569,96	4,18
AL	257.281	82,96	0,22	44,2	207.549,36	209.784,51	1.061.107,54	4.483.066,28	3.948.207,04	5,31
AP	5.394	82,96	0,22	44,2	4.351,36	4.398,22	22.246,55	93.989,29	1.018.817,94	0,43
AM	93.122	82,96	0,22	44,2	75.121,80	75.930,80	384.064,34	1.622.630,89	6.208.128,11	1,22
BA	769.738	82,96	0,22	44,2	620.949,98	627.637,14	3.174.640,95	13.412.519,67	24.825.295,91	2,53
CE	607.612	82,96	0,22	44,2	490.162,45	495.441,12	2.505.982,47	10.587.508,87	11.947.969,57	4,15
DF	15.013	82,96	0,22	44,2	12.111,03	12.241,46	61.918,32	261.598,31	6.169.523,00	0,20
ES	244.739	82,96	0,22	44,2	197.431,70	199.557,88	1.009.380,40	4.264.524,62	9.913.148,44	2,01
GO	1.873.669	82,96	0,22	44,2	1.511.494,48	1.527.772,11	7.727.598,65	32.648.280,73	16.633.929,66	9,18
MA	564.175	82,96	0,22	44,2	455.121,69	460.023,00	2.326.834,66	9.830.628,45	7.717.759,00	5,96
MT	162.783	82,96	0,22	44,2	131.317,54	132.731,73	671.368,15	2.836.458,88	9.799.972,19	1,35
MS	394.941	82,96	0,22	44,2	318.600,11	322.031,18	1.628.860,56	6.881.762,27	6.270.798,09	5,14
MG	3.122.017	82,96	0,22	44,2	2.518.540,60	2.545.663,35	12.876.177,36	54.400.477,06	55.775.626,67	4,56
PA	817.533	82,96	0,22	44,2	659.506,36	666.608,73	3.371.762,52	14.245.337,30	19.524.675,99	3,41
PB	279.510	82,96	0,22	44,2	225.481,57	227.909,83	1.152.786,91	4.870.401,84	5.597.875,67	4,07
PR	1.329.009	82,96	0,22	44,2	1.072.115,60	1.083.661,46	5.481.249,97	23.157.696,97	32.070.416,03	3,38
PI	102.247	82,96	0,22	44,2	82.482,97	83.371,24	421.698,70	1.781.632,06	3.699.450,10	2,25
RJ	340.890	82,96	0,22	44,2	274.997,00	277.958,51	1.405.937,28	5.939.935,19	38.118.657,22	0,73
RN	254.368	82,96	0,22	44,2	205.199,44	207.409,28	1.049.093,42	4.432.307,88	5.638.124,00	3,68
RS	1.160.993	82,96	0,22	44,2	936.576,58	946.662,79	4.788.299,29	20.230.054,18	29.620.972,48	3,20
RO	695.790	82,96	0,22	44,2	561.295,91	567.340,63	2.869.656,20	12.123.991,62	3.387.627,03	16,75
RR	17.532	82,96	0,22	44,2	14.143,12	14.295,43	72.307,47	305.491,34	975.304,76	1,47

(conclusão)										
Estado	Vacas leiteiras	SV (g.L ⁻¹)	B0 (Nm ³ CH ₄ . Kg SV ⁻¹)	Volume de água residuária (L. bovino ⁻¹ .d ⁻¹)	Metano SV (Nm ³ .d)	Eletricidade gerada anualmente (MWh)	Efeito estufa anual (ton eq. CO ₂)	Energia térmica (MJ/d)	Demanda de consumo de energia 2020 (MWh)	Potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)
SC	844.245	82,96	0,22	44,2	681.055,01	688.389,45	3.481.931,19	14.710.788,17	26.214.890,79	2,63
SP	1.009.582	82,96	0,22	44,2	814.432,87	823.203,68	4.163.832,83	17.591.749,96	129.224.449,33	0,64
SE	154.156	82,96	0,22	44,2	124.358,11	125.697,36	635.787,70	2.686.135,26	3.630.194,63	3,46
TO	521.606	82,96	0,22	44,2	420.781,15	425.312,64	2.151.266,75	9.088.872,75	2.453.201,22	17,34

Fonte: Autoria própria (2022)

APÊNDICE C- Abatedouro aves

(continua)

Estado	Abate aves (dia)	SV (g.L ⁻¹)	B0 (Nm ³ CH ₄ . Kg SV ⁻¹)	Volume de água residuária (L. ave - ¹ .d ⁻¹)	Água residuária gerada por dia (L.dia ⁻¹)	Carga SV (Kg SV /d)	Metano SV (Nm ³ .d)	Eletricidade gerada anualmente (MWh)	Efeito estufa anual (ton eq. CO ₂)	Energia térmica (MJ/d)	Demanda de consumo de energia 2020 (MWh)	Potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)
AC	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	1.102.569,96	0
AL	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	3.948.207,04	0
AP	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	1.018.817,94	0
AM	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	6.208.128,11	0
BA	124.911	2,0	0,252	20	2.498.227,51	4.996,46	1.259,11	1.272,67	6.437,25	27.196,70	24.825.295,91	0,01
CE	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	11.947.969,57	0
DF	124.520	2,0	0,252	20	2.490.402,85	4.980,81	1.255,16	1.268,68	6.417,09	27.111,52	6.169.523,00	0,02
ES	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	9.913.148,44	0
GO	1.164.922	2,0	0,252	20	23.298.437,48	46.596,87	11.742,41	11.868,87	60.033,73	253.636,11	16.633.929,66	0,07
MA	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	7.717.759,00	0
MT	592.062	2,0	0,252	20	11.841.242,08	23.682,48	5.967,99	6.032,26	30.511,66	128.908,50	9.799.972,19	0,06
MS	485.215	2,0	0,252	20	9.704.298,08	19.408,60	4.890,97	4.943,64	25.005,33	105.644,87	6.270.798,09	0,08
MG	1.112.991	2,0	0,252	20	22.259.821,42	44.519,64	11.218,95	11.339,77	57.357,50	242.329,32	55.775.626,67	0,02
PA	132.072	2,0	0,252	20	2.641.433,32	5.282,87	1.331,28	1.345,62	6.806,25	28.755,70	19.524.675,99	0,01
PB	63.872	2,0	0,252	20	1.277.437,59	2.554,88	643,83	650,76	3.291,61	13.906,70	5.597.875,67	0,01
PR	5.389.019	2,0	0,252	20	107.780.379,12	215.560,76	54.321,31	54.906,31	277.720,69	1.173.340,32	32.070.416,03	0,17
PE	165.771	2,0	0,252	20	3.315.413,86	6.630,83	1.670,97	1.688,96	8.542,92	36.092,92	14.152.882,08	0,01
PI	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	3.699.450,10	0
RJ	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	38.118.657,22	0
RN	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	5.638.124,00	0
RS	2.097.510	2,0	0,252	20	41.950.192,16	83.900,38	21.142,90	21.370,59	108.094,22	456.686,57	29.620.972,48	0,07
RO	44.526	2,0	0,252	20	890.520,99	1.781,04	448,82	453,66	2.294,63	9.694,57	3.387.627,03	0,01
RR	0	2,0	0,252	20	0	0,00	0	0	0	0	975.304,76	0

(conclusão)												
Estado	Abate aves (dia)	SV (g.L ⁻¹)	B0 (Nm ³ CH ₄ . Kg SV ⁻¹)	Volume de água residuária (L. ave ⁻¹ .d ⁻¹)	Água residuária gerado por dia (L.dia ⁻¹)	Carga SV (Kg SV /d)	Metano SV (Nm ³ .d)	Eletricidade gerada anualmente (MWh)	Efeito estufa anual (ton eq. CO ₂)	Energia térmica (MJ/d)	Demanda de consumo de energia 2020 (MWh)	Potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)
SC	2.245.747	2,0	0,252	20	44.914.944,16	89.829,89	22.637,13	22.880,92	115.733,58	488.962,05	26.214.890,79	0,09
SP	1.231.810	2,0	0,252	20	24.636.200,77	49.272,40	12.416,65	12.550,36	63.480,78	268.199,54	129.224.449,33	0,01
SE	0	2,0	0,252	20	0	0	0	0	0	0	3.630.194,63	0
TO	56.260	2,0	0,252	20	1.125.203,51	2.250,41	567,10	573,21	2.899,34	12.249,42	2.453.201,22	0,02

Fonte: Autoria própria (2022)

APÊNDICE D- Abatedouro suínos e bovinos

(continua)

Estado	Abate suínos e bovinos (dia)	SV (g.L ⁻¹)	B0 CH ₄ (Nm ³ Kg SV ⁻¹)	Volume de água residual (L. bovino)	Volume de água residual (L. suíno)	Água residual gerada por dia (L.d ⁻¹)	Carga SV (Kg SV/d)	Metano SV (Nm ³ .d)	Eletricidade gerada anualmente (MWh)	Efeito estufa anual (ton eq. CO ₂)	Energia térmica (MJ/d)	Demanda de consumo de energia 2020 (MWh)	Potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)
AC	406.456	8,2	0,252	1000	600	1.074.528,22	8.789,64	2.214,99	2.238,84	11.324,26	47.843,77	1.102.569,96	0,20
AL	116.457	8,2	0,252	1000	600	306.377,53	2.506,17	631,55	638,36	3.228,86	13.641,57	3.948.207,04	0,02
AP	0	8,2	0,252	1000	600	0	0	0	0	0	0	1.018.817,94	0
AM	219.004	8,2	0,252	1000	600	591.934,25	4.842,02	1.220,19	1.233,33	6.238,29	26.356,09	6.208.128,11	0,02
BA	1.102.099	8,2	0,252	1000	600	2.858.299,73	23.380,89	5.891,98	5.955,44	30.123,10	127.266,87	24.825.295,91	0,02
CE	285.787	8,2	0,252	1000	600	610.837,81	4.996,65	1.259,16	1.272,72	6.437,51	27.197,78	11.947.969,57	0,01
DF	114.858	8,2	0,252	1000	600	188.807,67	1.544,45	389,20	393,39	1.989,81	8.406,73	6.169.523,00	0,01
ES	511.220	8,2	0,252	1000	600	1.101.975,89	9.014,16	2.271,57	2.296,03	11.613,52	49.065,89	9.913.148,44	0,02
GO	4.706.642	8,2	0,252	1000	600	10.797.911,23	88.326,91	22.258,38	22.498,09	113.797,20	480.781,06	16.633.929,66	0,14
MA	581.817	8,2	0,252	1000	600	1.584.445,48	12.960,76	3.266,11	3.301,29	16.698,18	70.548,03	7.717.759,00	0,04
MT	8.034.614	8,2	0,252	1000	600	18.786.220,27	153.671,28	38.725,16	39.142,20	197.984,53	836.463,52	9.799.972,19	0,40
MS	5.565.731	8,2	0,252	1000	600	12.863.580,82	105.224,09	26.516,47	26.802,03	135.566,92	572.755,77	6.270.798,09	0,43
MG	8.686.712	8,2	0,252	1000	600	17.221.537,53	140.872,18	35.499,79	35.882,09	181.494,62	766.795,43	55.775.626,67	0,06
PA	2.223.061	8,2	0,252	1000	600	6.084.801,64	49.773,68	12.542,97	12.678,04	64.126,61	270.928,08	19.524.675,99	0,06
PB	59.366	8,2	0,252	1000	600	162.646,58	1.330,45	335,27	338,88	1.714,10	7.241,90	5.597.875,67	0,01

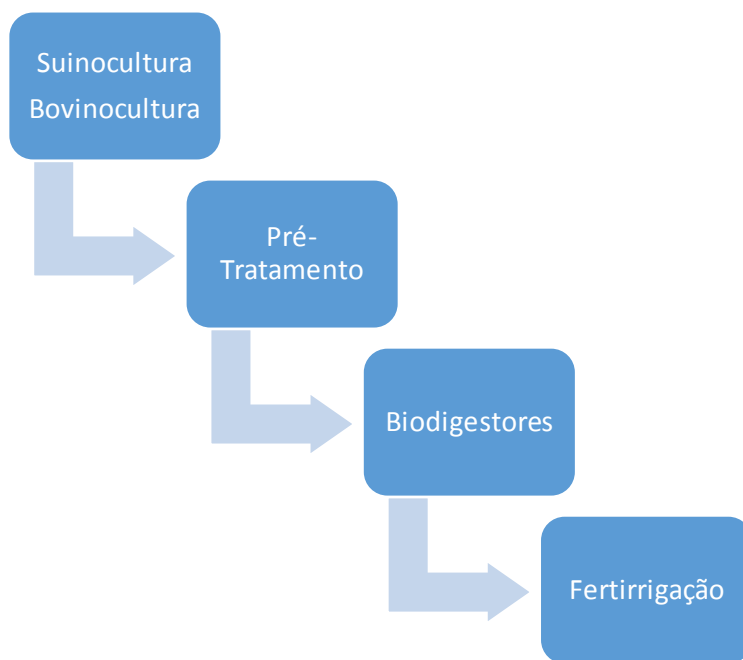
													(conclusão)
Estado	Abate suínos e bovinos (dia)	SV (g.L ⁻¹)	B0 (Nm ³ CH ₄ . Kg SV ⁻¹)	Volume de água residual (L. bovino)	Volume de água residual (L. suíno)	Água residual gerada por dia (L.d ⁻¹)	Carga SV (Kg SV/d)	Metano SV (Nm ³ .d)	Eletricidade gerada anualmente (MWh)	Efeito estufa anual (ton eq. CO ₂)	Energia térmica (MJ/d)	Demanda de consumo de energia 2020 (MWh)	Potencial de geração de energia em relação a demanda por estado (%)
PR	11.405.591	8,2	0,252	1000	600	20.336.921,10	166.356,01	41.921,72	42.373,18	214.327,08	905.509,06	32.070.416,03	0,13
PE	301.473	8,2	0,252	1000	600	755.658,63	6.181,29	1.557,68	1.574,46	7.963,75	33.645,98	14.152.882,08	0,01
PI	131.383	8,2	0,252	1000	600	333.372,60	2.726,99	687,20	694,60	3.513,35	14.843,54	3.699.450,10	0,02
RJ	349.533	8,2	0,252	1000	600	747.286,03	6.112,80	1.540,43	1.557,01	7.875,51	33.273,19	38.118.657,22	0,004
RN	92.087	8,2	0,252	1000	600	236.016,99	1.930,62	486,52	491,76	2.487,34	10.508,75	5.638.124,00	0,01
RS	10.281.481	8,2	0,252	1000	600	18.985.282,74	155.299,61	39.135,50	39.556,96	200.082,41	845.326,85	29.620.972,48	0,13
RO	2.183.605	8,2	0,252	1000	600	5.978.218,63	48.901,83	12.323,26	12.455,97	63.003,35	266.182,43	3.387.627,03	0,37
RR	87.692	8,2	0,252	1000	600	240.252,05	1.965,26	495,25	500,58	2.531,97	10.697,31	975.304,76	0,05
SC	14.809.584	8,2	0,252	1000	600	25.007.000,55	204.557,26	51.548,43	52.103,57	263.544,19	1.113.446,10	26.214.890,79	0,20
SP	5.816.350	8,2	0,252	1000	600	12.980.815,34	106.183,07	26.758,13	27.046,30	136.802,43	577.975,68	129.224.449,33	0,02
SE	0	8,2	0,252	1000	600	0	0	0	0	0	0	3.630.194,63	0
TO	894.811	8,2	0,252	1000	600	2.451.536,99	20053,57	5.053,50	5.107,92	25.836,30	109.155,61	2.453.201,22	0,21

Fonte: Autoria própria (2022)

APÊNDICE E- Dimensionamento dos sistemas de biodigestores

1. Dimensionamento de Biodigestores da Suinocultura e da Bovinocultura

Figura 1 – Fluxograma de Design do Sistema de Tratamento para Suinocultura e Bovinocultura



1.1 Dimensionamento de Sistemas de tratamento por biodigestor para Suinocultura

i) Determinação de suínos para uma Granja Padrão

A determinação do número de suínos de uma granja padrão foi determinada a partir de dados do documento Mapeamento da Suinocultura Brasileira (2016) para determinar o número de suínos médio por propriedade rural (Tabela 1).

Tabela 1 – Propriedades rurais de Unidades de Terminação designadas pelo número de suínos médios.

Região	MT	MS	GO	DF	MG	SC	RS	PR	AC
Granjas (UT)	100	70	165	10	241	5736	5077	2560	32
Capacidade média	4500	3038	4059	7260	2808	649	606	923	422

Fonte: SEBRAE (2016).

Realizando o cálculo de unidade de granja de terminação relativo ao número médio de suínos, obtém-se o valor de 805 suínos por Granja e o valor da mediana, a partir da análise por estado, o valor de 2808 suínos por Granja.

Desta forma, para uma granja padrão de 805 suínos, tem-se:

ii) O Pré-tratamento a ser adotado para a entrada do Biodigestor

Para a entrada do Biodigestor pode-se adotar uma caixa de passagem com gradeamento médio como pré-tratamento. O gradeamento médio adotado foi o de barras de 10x50mm com espaçamento de 25 mm. A limpeza a ser realizada é de forma manual.

iii) Dimensionamento volumétrico dos biodigestores

O Dimensionamento dos biodigestores pode ser realizado a partir do parâmetro tempo de detenção hidráulico (TDH) ou análise do processo cinético de transformação do carbono disponível no efluente para metano. Porém, para simplificação do processo de dimensionamento e determinação de um biodigestor para uma propriedade padrão, utilizou-se o TDH.

O TDH observado para biodigestores da suinocultura varia de 30 a 45 dias (OLIVEIRA, 2004; RANZI, 2004; HENN, 2005; ALVES, 2007). Desta forma, a

partir do dado médio de 6,26 L/(suíno.d) determinado neste trabalho, o biodigestor teria o volume de aproximadamente 24.150 L para TDH de 30 dias. Visando otimizar o sistema de biodigestor, bem como minimizar perdas de produção de biogás devido ao acúmulo de sólidos no sistema de tratamento, pode-se adotar um sistema biológico de tratamento com um TDH máximo de 45 dias.

Assim, verificou-se inicialmente a adoção de 2 biodigestores que podem ser dimensionados de forma volumétrica segundo a Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensionamento do Sistema de biodigestores

	Biodigestor 1	Biodigestor 2
Volume (L)	18.113	18.113

iv) Dimensões dos Biodigestores

As dimensões adotadas inicialmente para o sistema foram:

Largura = 1,4 m

Comprimento = 4,2 m

Profundidade útil (adotado) = 3,0 m

Porém, devido a pequena dimensão de cada biodigestor, observa-se na prática a adoção de apenas 1 biodigestor para esta granja padrão média. Assim, as novas dimensões para o biodigestor 1 ficariam iguais a:

Largura = 2,0 m

Comprimento = 6,0 m

Profundidade útil (adotado) = 3,0 m

1.2 Dimensionamento de Sistemas de tratamento por biodigestor para Bovinocultura

i) Determinação do número médio de bovinos por produtor rural no Brasil

A partir de dados do IBGE (2019) com a produção equivalente igual a 30.156.255 (1000 L) de leite no Brasil e com 1.176.000 de produtores, observa-se uma média de 107 L por dia em uma propriedade rural padrão média no Brasil. A grande maioria dos produtores, cerca de 93%, produzia até 200 litros de leite diariamente no Brasil.

Assim, para o dimensionamento de um biodigestor de uma propriedade padrão, escolheu-se utilizar a produção de 200 L/d visando abranger a maioria dos produtores de leite.

A produção média de leite por vaca no Censo Agropecuário (IBGE, 2019) foi de 2.621 L/ano ou 7,2 L/vaca. Assim para uma propriedade rural produzir 200 L/d de leite no Brasil, tem-se em média 28 vacas leiteiras.

ii) O Pré-tratamento a ser adotado para a entrada do Biodigestor

Para a entrada do Biodigestor pode-se adotar uma caixa de passagem com gradeamento médio como pré-tratamento. O gradeamento médio adotado foi o de barras de 10x50 mm com espaçamento de 35 mm, pois os resíduos gerados na bovinocultura tem como característica uma maior quantidade de sólidos por volume comparativamente ao resíduo de suínos. Portanto, de forma geral, necessita-se de maior uso de água de limpeza nos sistemas de curral. A limpeza a ser realizada é de forma manual.

iii) Dimensionamento volumétrico dos biodigestores

O Dimensionamento dos biodigestores pode ser realizado a partir do parâmetro tempo de detenção hidráulico (TDH) ou análise do processo cinético de transformação do carbono disponível no efluente para metano. Porém, para simplificação do processo de dimensionamento e determinação de um biodigestor para uma propriedade padrão, utilizou-se o TDH.

O TDH observado para biodigestores da bovinocultura pode ser de 35 a 40 dias (JUNQUEIRA, 2014). Desta forma, a partir do dado médio de 44,2 L/(bovino.d) determinado neste trabalho, o biodigestor para um TDH de 35 dias teria volume de aproximadamente 43.316 L e para TDH de 40 dias de 49.504 L.

iv) Dimensões dos Biodigestores

Visando otimizar o sistema de biodigestor para suportar sobrecargas, bem como minimizar perdas de produção de biogás devido ao acúmulo de sólidos no sistema de tratamento, pode-se adotar um TDH de 40 dias.

Assim, pela similaridade do volume relativo à suinocultura, adotou-se 1 biodigestor com as dimensões:

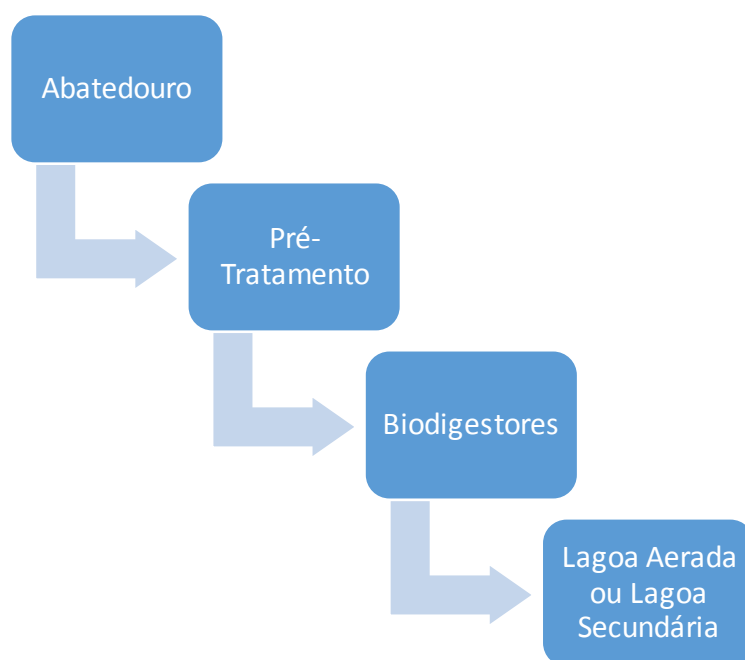
Largura = 2,3 m

Comprimento = 6,9 m

Profundidade útil (adotado) = 3,0 m

2. Dimensionamento de Biodigestores de Abatedouros

Figura 2 – Fluxograma de Design do Sistema de Tratamento para Suinocultura e Bovinocultura



2.1 Dimensionamento dos biodigestores para Abatedouro de Aves

i) Determinação de um Abatedouro de Aves médio

A partir de dados relativos a classes de frangos abatidos (Tabela 3) relativo ao abate diário realizado por abatedouros no Brasil, pode-se caracterizar que a maioria dos estabelecimentos possui um abate diário entre 10 a 100 mil cabeças de frango por dia (IBGE, 2022).

Tabela 3 – Abates diários de frangos segundo classes

Frangos abatidos diariamente	Estabelecimentos	Quantidade de abate relativo ao total (%)
Até 10 mil	85	30,7
10 a 100 mil	112	40,4
100 a 200 mil	54	19,5
200 a 300 mil	16	5,8
Mais de 300 mil	10	3,6

A média de abates diários foi de 71.544 cabeças por abatedouro (IBGE, 2022). Isto produz uma geração de efluentes média de aproximadamente 1431 m³/d com uma concentração entre 1.400 a 11.118 mgO₂/L.

ii) Dimensionamento dos Biodigestores

O sistema de biodigestores foi considerado como um Sistema de Lagoas Anaeróbias sequenciais cobertas com uma manta para realização do armazenamento do biogás.

A partir de referências da CETESB (1999) adotou-se uma carga volumétrica de 0,40 Kg DBO/(m³.d) para a Lagoa 1 e uma carga volumétrica de 0,30 Kg DBO/(m³.d) para a Lagoa 2.

Desta forma, a partir de uma carga de DBO média de 8.956 Kg DBO/d. O Biodigestor 1 possui um volume de 22.392 m³ que corresponde a um Tempo de Detenção Hidráulico de 15,65 dias. A eficiência média adotada para o Biodigestor 1 foi de 50%. O biodigestor 2 possui um volume 14.928 m³ que corresponde a um Tempo de Detenção Hidráulico de 10,43 dias.

iii) Dimensões dos Biodigestores

O biodigestor 1 obteve as dimensões:

Superfície: 65 x 118 m

Fundo: 45 x 98 m

Altura útil: 4 m

Altura total: 5 m

O biodigestor 2 obteve as dimensões:

Superfície: 55 x 98 m

Fundo: 35 x 78 m

Altura útil: 4 m

Altura total: 5 m

2.2 Dimensionamento de Sistemas de tratamento por biodigestor para Abatedouro de Suínos e Bovinos

i) Determinação de um Abatedouro de suínos e bovinos

A partir de dados relativos a classes de suínos abatidos (Tabela 4) relativo ao abate diário realizado por abatedouros no Brasil, pode-se caracterizar que a maioria dos estabelecimentos possui um abate diário de suínos com mais de 500 cabeças por dia (IBGE, 2022).

Tabela 4 – Abates diários de suínos segundo classes

Suínos abatidos diariamente	Estabelecimentos	Quantidade de abate relativo ao total (%)
Até 25	325	1,0
25 a 50	45	1,0
50 a 100	45	1,8
100 a 500	99	12,7
Mais de 500	71	83,5

A média de abates de suínos mensais foi de 1.947 cabeças por abatedouro ou aproximadamente 76 cabeças por dia por abatedouro.

A partir de dados relativos a classes de bovinos abatidos (Tabela 5) relativo ao abate diário, pode-se caracterizar que a maioria dos estabelecimentos possui um abate diário de bovinos de 100 a 500 cabeças por dia (IBGE, 2022).

Tabela 5 – Abates diários de bovinos segundo classes

Bovinos abatidos diariamente	Estabelecimentos	Quantidade de abate relativo ao total (%)
Até 25	635	5,2
25 a 50	123	5,0
50 a 100	99	7,7
100 a 500	153	41,7
Mais de 500	46	40,4

A média de abates de bovinos foi de aproximadamente 256 cabeças por dia por abatedouro.

Desta forma, a produção de efluentes para um Abatedouro de suínos e bovinos seria de aproximadamente

A concentração de DBO média para Abatedouros de Bovinos e Suínos podem variar de 1.100 a 8480 mg/L (CETESB, 1999). A concentração média utilizada foi de 4813 mg/L com uma carga média obtida foi de 1451,6 Kg DBO/d.

ii) Dimensionamento dos Biodigestores

O sistema de biodigestores foi considerado como um Sistema de Lagoas Anaeróbias sequenciais cobertas com uma manta para realização do armazenamento do biogás.

Utilizou-se as referências da CETESB (1999) para os valores de carga volumétrica.

Desta forma, a partir de uma carga de DBO média de 1.451 Kg DBO/d. O Biodigestor 1 possui um volume de 3.629 m³ que corresponde a um TDH de 12 dias. A eficiência média adotada para o Biodigestor 1 foi de 50%. O biodigestor 2 possui um volume 2.419 m³ que corresponde a um Tempo de Detenção Hidráulico de 8 dias.

iii) Dimensões dos Biodigestores

O biodigestor 1 obteve as dimensões:

Superfície: 35 x 59 m

Fundo: 19 x 43 m

Altura útil: 3 m

Altura total: 4 m

O biodigestor 2 obteve as dimensões:

Superfície: 30 x 50 m

Fundo: 14 x 34 m

Altura útil: 3 m

Altura total: 4 m