

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS
PROVENIENTES DO PROCESSAMENTO DE MANDIOCA E DEJETO BOVINO NO
MUNICÍPIO DE SÃO FRANCISCO DE ITABAPOANA, RJ.**

EVERALDO VIEIRA PINTO

MACAÉ-RJ

2021

EVERALDO VIEIRA PINTO

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS
PROVENIENTES DO PROCESSAMENTO DE MANDIOCA E DEJETO BOVINO NO
MUNICÍPIO DE SÃO FRANCISCO DE ITABAPOANA, RJ.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Avaliação, Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Orientador(a): Dr. Adriano Henrique Ferrarez

Coorientador(a): Dr. Marcos Antônio Cruz Moreira

MACAÉ-RJ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P659p Pinto, Everaldo Vieira, 1972-.
Potencial de produção de biogás a partir dos resíduos provenientes do processamento de mandioca e dejetos bovinos no município de São Francisco de Itabapoana, RJ. / Everaldo Vieira Pinto. — Macaé, RJ, 2021.
100 f.: il. color.

Orientador: Adriano Henrique Ferrarez, 1977-.
Coorientador: Marcos Antônio da Cruz Moreira, 1964-.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2021.
Inclui referências.
Área de concentração: Sustentabilidade Regional.
Linha de Pesquisa: Avaliação, Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

1. Biogás - São Francisco de Itabapoana, RJ. 2. Resíduos como combustíveis - mandioca - dejetos bovinos. 3. Biodigestores. 4. Biomassa. 5. Sustentabilidade. I. Ferrarez, Adriano Henrique, 1977-, orient. II. Moreira, Marcos Antônio da Cruz, 1964-, coorient. III. Título.

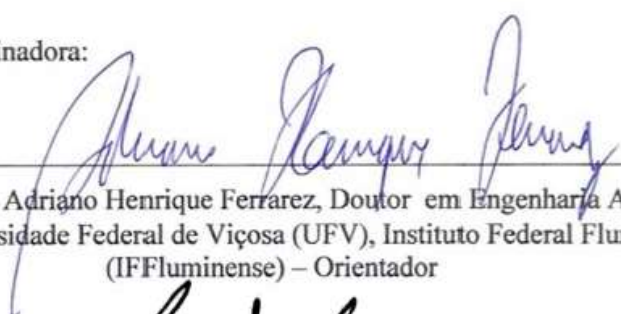
CDD 665.776

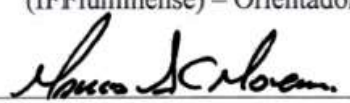
(23. ed.)

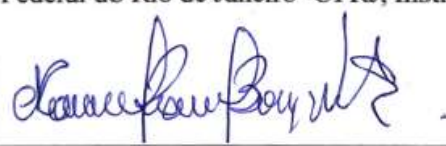
Dissertação intitulada **POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DO PROCESSAMENTO DE MANDIOCA E DEJETO BOVINO NO MUNICÍPIO DE SÃO FRANCISCO DE ITABAPOANA, RJ**, elaborada por **EVERALDO VIEIRA PINTO** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Avaliação, Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.


Aprovado em: 24/02/2021

Banca Examinadora:


Prof. D.Sc. Adriano Henrique Ferrarez, Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador


Prof. D.Sc. Marcos Antônio Cruz Moreira, Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, Instituto Federal Fluminense


Prof. D.Sc. Manuel Rangel Borges Neto, Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará – Instituto Federal do Sertão Pernambucano(IFSertão)-


Prof. D.Sc. Murilo de Oliveira Souza, Doutor em Ciências Naturais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Membro da banca

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus primeiramente, aos meus pais Elias e Ivani ambos “*in memoriam*” aos meus filhos Ramon Ferreira e Rodolfo Ferreira e minha esposa Verônica, além de todas as renúncias em prol do meu sucesso e crescimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada meu guia, consolador e protetor.

Aos meus pais, Elias Malaquias Pinto e Ivani Assis Vieira Pinto ambos “*in memoriam*” e a minha esposa Verônica da Silva Ferreira Pinto, aos meus filhos que por muitas vezes deixei de brincar e passear em função dos estudos que com muito amor, paciência e dedicação me ajudaram a concluir essa etapa do Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental.

Ao Instituto Federal Fluminense,(*campus* Macaé, Itaperuna e Bom Jesus), instituição que faz parte de minha vida profissional pois aqui exerço minha atividade laboral diária há mais de duas décadas como técnico administrativo.

Ao Laboratório de Biogás e Energias Renováveis – LABER – no *campus* Itaperuna, viabilizando a ocorrência dos experimentos em escala laboratorial.

Ao meu orientador, Professor Dr. Adriano Henrique Ferrarez, por ser um excepcional docente pesquisador, por toda paciência e conhecimento a mim passados, além de ser muito solícito, desempenhando um papel imprescindível para a concretização dessa etapa acadêmica.

Ao meu co orientador Professor Dr. Marcos Antônio Cruz Moreira por confiar na minha pessoa, e a dedicação em esclarecer dúvidas sempre que foi solicitado.

A Prefeitura Municipal de São Francisco de Itabapoana na figura do Secretário de Meio Ambiente e Defesa civil, Sr. Ilzomar Soares Filho.

Aos extencionistas do Escritório da Emater Rio do Município, especialmente ao senhor João Henrique Pereira das Posses por fornecer gentilmente dados históricos sobre as casas de farinha do município. As Casas de Farinha do Município de São Francisco do Itabapoana.

Aos professores que pacientemente contribuíram com meu aprendizado, contribuindo para a minha formação profissional e que me deram grande incentivo e apoio para elaboração deste e de outros trabalhos ao longo do curso.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, a amiga Italla Maria Abreu de Azevedo que não mediu esforços ao entregar documentos no Campus Macaé, a aluna do curso de licenciatura em química do IFF Campus Itaperuna Tainá da Silva Picanço o meu muito obrigado.

As senhoras Célia Caetano Dornas Correa, Maria José Neto Cúrcio e Makelly Araújo, do setor de Reprografia do IFFluminense Campus Bom Jesus que não mediram esforços todas as vezes em que lá estive para reproduzir ou imprimir algum trabalho sempre me atenderam com muito carinho e atenção.

EPÍGRAFE

“Seja você quem for, seja qual for à posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá”. (Ayrton Senna)

LISTA DE FIGURAS

APRESENTAÇÃO

Figura 1 – Área de plantio de mandioca no município de São Francisco de Itabapoana/RJ.....	2
--	---

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Figura 1 – Esquema digestão anaeróbica.....	6
Figura 2 – Artigos publicados por ano.....	17
Figura 3 – Revistas científicas em que os trabalhos foram publicados.....	17
Figura 4 - Pais de origem dos trabalhos.....	18

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Figura 1 – (a) Prensagem da massa de mandioca; (b) manipueira.....	26
Figura 2 - Dejeito Bovino.....	27
Figura 3 – Esquema do digestor de bancada.....	30
Figura 4 – Digestores de bancada utilizados no experimento.....	32
Figura 5 - Phmetro de bancada digital.....	33
Figura 6 - Condutivímetro de bancada.....	33
Figura 7- Analisador de DBO 5 dias.....	34
Figura 8- (a) Tubo com solução para análise de DQO; (b) Tubos preparados para introdução no bloco digestor; (c) bloco digestor DQO 25 provas/ termoreator/ Dry-block; e (d) espectrofotômetro digital.....	35
Figura 9 – Analisador de biogás	36
Figura 10 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D1.....	40
Figura 11 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D2.....	40
Figura 12 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D3.....	41
Figura 13 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D4.....	42

Figura 14 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D5.....	42
Figura 15 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D6.....	43
Figura 16 – Produção média acumulada de biogás nas triplicatas.....	43
Figura 17 – Teor de CH ₄ do biogás produzido nos digestores da triplicata D1.....	44
Figura 18 – Teor de CH ₄ do biogás produzido na triplicata B2.....	45
Figura 19 – Teor de CH ₄ do biogás produzido na triplicata D3.....	45
Figura 20 – Teor de CH ₄ do biogás produzido na triplicata D4.....	46
Figura 21 – Teor de CH ₄ do biogás produzido na triplicata D5.....	46
Figura 22 – Teor de CH ₄ do biogás produzido na triplicata D6.....	47

ARTIGO CIENTÍFICO 3

Figura 1 – Mapa do município de São Francisco de Itabapoana.....	55
Figura 2 – Fases da digestão anaeróbica.....	58
Figura 3 – Fluxograma da Ferramenta Computacional SAUDADE.....	60
Figura 4 – Produção de mandioca em São Francisco de Itabapoana entre 2009 e 2018.....	70
Figura 5 - Rebanho bovino no município de São Francisco de Itabapoana.....	71
Figura 6 - Volume de manipueira produzido.....	72
Figura 7 - Produção de biogás e biometano.....	73
Figura 8 - Potência elétrica gerada e energia elétrica produzida a partir do biogás/biometano...	74
Figura 9 - Tanques de ônibus e caminhões abastecidos.....	74
Figura 10 - Estimativa de produção de biofertilizante a partir da manipueira.....	75
Figura 11 - Estimativa de produção de biofertilizante a partir de dejetos bovinos.....	76
Figura 12 - Redução da emissão de CO ₂	77

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Tabela 1 – Proporções de mistura volume/volume (v/v) de inóculo, manipueira (M) e dejetos bovinos (DB).....	31
Tabela 2 – Valores médios de parâmetros físico-químicos do afluente (AF) e efluente (EF) em cada triplicata.....	36
Tabela 3 – Valores médios de ST, SF e SV do afluente (AF) e efluente (EF) em cada triplicata.....	37
Tabela 4 – Valores médios de DBO do afluente e efluente em cada triplicata.....	38
Tabela 5 – Valores médios de DQO afluente (AF) e efluente (EF) em cada triplicata.....	39

LISTA DE QUADROS

ARTIGO CIENTÍFICO 3

Quadro 1 – Cenários para estimativa da produção de biogás/biometano a partir da codigestão de manipueira e dejetos bovinos.....	61
Quadro 2 – Potencial de biogás dos resíduos agropecuários.....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

CH ₄ - Metano.....	6
CO ₂ - Gás carbônico.....	23
CO - Monóxido de carbono.....	51
H ₂ - Hidrogênio.....	40
H ₂ S - Gás sulfídrico.....	51
HCN - Ácido cianídrico.....	5
H ₂ CO ₂ - Ácido carbônico.....	6
H ₂ SO ₄ - Ácido sulfúrico.....	16

K - Potássio.....	90
$K_2Cr_2O_7$ – Dicromato de potássio.....	49
N - Nitrogênio.....	90
NaOH - Hidróxido de sódio.....	10
NaHCO ₃ - Bicarbonato de sódio.....	18
N – NH ₃ – Nitrogênio amoniacal	19
NO – Monóxido de nitrogênio.....	20
O ₂ – Oxigênio.....	51
P – Fósforo.....	90
SO ₄ ⁻² – íon sulfato.....	19
SO – Monóxido de enxofre.....	20
S ⁻² – íon sulfeto.....	19

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação brasileira de normas técnicas
- AGV - Ácido graxo volátil.
- APHA – American public health association
- AF – Afluente
- AT - Alcalinidade total.
- AV - Acidez volátil.
- EF - Efluente
- CAPES - Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior
- CE – Condutividade elétrica
- CEPEA - Centro de estudos avançados em economia aplicada.
- CIBiogás - Centro internacional de energia renováveis - Biogás.
- C/N - Relação carbono e nitrogênio.
- CNP - Carbono, nitrogênio, fósforo.
- CONAMA – Conselho nacional do meio ambiente
- DB – Dejeito bovino
- DBO - Demanda bioquímica de oxigênio.
- DQO - Demanda química de oxigênio.
- EMATER - Empresa de assistência técnica e extensão rural.
- EMBRATER - Empresa brasileira de assistência técnica e extensão rural.
- ETE - Estação de tratamento de esgoto.
- FAO - Organização das nações unidas para alimentação e a agricultura.
- FITS - Tarifa renovável avançada.
- FT – Fósforo total
- g - Grama
- GRI - Global reporting initiative.
- h - Hora.
- ha - Hectare.
- IBGE - Instituto brasileiro de geografia e estatística.

IDEB - Índice de desenvolvimento da educação básica

IDHM - Índice de desenvolvimento humano municipal

IFFluminense - Instituto federal fluminense.

kJ - Quilo joule.

kWh - Quilowatt-hora.

L – Litro

M - Manipueira

MHAP - Pré tratamento com aquecimento por micro ondas.

mL – Mililitro

NBR - Norma técnica brasileira

NTK - Nitrogênio total de kjeldahl.

NT - Nitrogênio total

pH - Potencial hidrogeniônico.

PPEA - Programa de Pós-Graduação em engenharia ambiental.

PIB – Produto interno bruto

PVC - Policloreto de vinila

PT - Fósforo total

RJ - Rio de Janeiro.

SAUDADE - Sistema de avaliação do uso da digestão anaeróbica para o dimensionamento energético

SHAP - Pré tratamento com aquecimento a vapor

SS - Sólidos suspensos

SSV - Sólidos suspendidos voláteis.

ST - Sólidos totais.

SV - Sólidos voláteis.

TRH - Tempo de retenção hidráulica.

t - Tonelada

UASB - Upflow anaerobic sludge blanket.

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS
PROVENIENTES DO PROCESSAMENTO DE MANDIOCA E DEJETO BOVINO NO
MUNICÍPIO DE SÃO FRANCISCO DE ITABAPOANA, RJ.**

RESUMO

A mandioca é uma planta originária da América do Sul. O Brasil é o segundo maior produtor de mandioca do mundo, sendo um produto de elevadíssima importância socioeconômica, tanto na alimentação humana como animal. O processo produtivo da mandioca gera resíduos com altas cargas orgânicas. Sendo a maior parte das indústrias de processamento de mandioca de pequeno porte e oriundas da agricultura familiar. O manejo inadequado dos resíduos produzidos pela atividade provocam a contaminação de corpos hídricos, cobertura vegetal, lençol freático e aumento da emissão de gases do efeito estufa. O tratamento desses resíduos geralmente é realizado em lagoas de estabilização em que o gás produzido da decomposição dos efluentes é liberado diretamente para a atmosfera. Uma das alternativas para tratar os efluentes da atividade é a digestão anaeróbia (processo realizado por microrganismos na ausência de oxigênio) que gera dois subprodutos: biogás e biofertilizante. O município de São Francisco de Itabapoana é o maior produtor de mandioca do estado do Rio de Janeiro respondendo com 30,92 % da produção estadual. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é: (i) Avaliar o estado da arte da produção de biogás a partir de resíduos da mandioca; (ii) Avaliar a produção e composição do biogás produzido a partir dos resíduos do processamento de mandioca; (iii) Estimar o potencial de produção de biogás a partir dos resíduos do processamento de mandioca e dejetos bovinos no município de São Francisco de Itabapoana/RJ.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. Biodigestores. Biomass. Sustentabilidade. Cassava

***BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL FROM WASTE FROM PROCESSING
CASSAVA AND BOVINE WASTE IN THE MUNICIPALITY OF SÃO FRANCISCO DE
ITABAPOANA, RJ.***

ABSTRACT

Cassava is a plant originally from South America. Brazil is the second largest producer of cassava in the world, being a product of very high socioeconomic importance, both in human and animal food. The cassava production process generates waste with high organic loads. Most of the small-scale cassava processing industries come from family farming. The inadequate handling of waste produced by the activity causes contamination of water bodies, vegetation cover, groundwater and an increase in the emission of greenhouse gases. The treatment of these residues is usually carried out in stabilization ponds in which the gas produced from the decomposition of effluents is released directly into the atmosphere. One of the alternatives to treat the effluents from the activity is anaerobic digestion (a process carried out by microorganisms in the absence of oxygen) that generates two by-products: biogas and biofertilizer. The municipality of São Francisco de Itabapoana is the largest producer of cassava in the state of Rio de Janeiro, accounting for 30.92% of state production. In this sense, the objective of this work is: (i) To evaluate the state of the art of biogas production from cassava residues; (ii) Assess the production and composition of biogas produced from residues from cassava processing; (iii) Estimate the potential for biogas production from residues from cassava and bovine manure processing in the municipality of São Francisco de Itabapoana/RJ.

Keywords: *Solid waste. Biodigesters. Biomass. Sustainability. Cassava*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE QUADROS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xii
RESUMO.....	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	1
ARTIGO CIENTÍFICO 1 – ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DA MANDIOCA.....	3
RESUMO	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	7
Estado da arte da produção de biogás a partir dos resíduos da mandioca.....	7
DADOS BIBLIOMÉTRICOS.....	17
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	19

ARTIGO CIENTÍFICO 2 - AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO E DO TEOR DE METANO DO BIOGÁS OBTIDO A PARTIR DA CODIGESTÃO DE RESÍDUOS DA MANDIOCA E DEJETO BOVINO.....	22
RESUMO.....	22
ABSTRACT	23
1. INTRODUÇÃO.....	24
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
2.1. Obtenção dos resíduos.....	26
2.1.1 Manipueira.....	26
2.1.2 Dejeto bovino.....	27
2.2. Caracterização físico-química (teor de sólidos) dos resíduos dejeto bovino e manipueira.	27
2.2.1 Amostras de manipueira.....	27
2.2.2 Amostras de dejeto bovino.....	28
2.2.3. Medição do pH.....	30
2.3. Construção dos digestores anaeróbicos de bancada.....	30
2.4. Carregamentos dos digestores anaeróbicos.....	31
2.5. Análise físico-química do substrato (afluente) e do digestato (efluente) nas triplicatas.....	32
2.6. Leitura da produção de biogás.....	35
2.7. Análise do teor de metano do biogás.....	36
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
3.1. Parâmetros físico-químicos do substrato (afluente) e do digestato (efluente) nas triplicatas.....	36
3.2. Produção de biogás.....	40
3.3 Análise do teor de metano do biogás produzido.....	44
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

ARTIGO CIENTÍFICO 3

ARTIGO CIENTÍFICO 3 - POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA E DE BIOFERTILIZANTE A PARTIR DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DA MANDIOCA E DE DEJETO BOVINO NO MUNICÍPIO DE SÃO FRANCISCO DE ITABAPOANA.....	53
RESUMO	53
ABSTRACT.....	54
1. INTRODUÇÃO.....	55
1.1 Cultivo de mandioca.....	56
1.2 Bovinocultura.....	57
1.3. Resíduos.....	57
1.4. Digestão anaeróbica.....	58
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	60
2.1. Ferramenta computacional saude.....	60
2.2 Fontes de dados.....	60
2.2.1 Cenários.....	60
2.2.2 Produção de manipueira.....	62
2.2.3 Produção de dejetos bovinos.....	62
2.2.4 Produção de biogás.....	63
2.2.5 Produção de biogás a partir da manipueira.....	63
2.2.6 Produção de biogás a partir do dejetos bovinos.....	63
2.2.7 Produção de biometano.....	64
2.2.8 Potencial de energia a partir do biometano.....	64
2.2.9 Potência elétrica a partir do biometano.....	65
2.2.10 Energia elétrica produzida.....	65
2.2.11 Potencial de abastecimento de veículos.....	66

2.2.11.1 Ônibus.....	66
2.2.11.2 Caminhões.....	66
2.2.12 Potencial de biofertilizante obtido a partir do digestato.....	67
2.2.13 Potencial de biofertilizante da manipueira.....	67
2.2.13.1 Nitrogênio contido na manipueira.....	67
2.2.13.2 Fósforo contido na manipueira.....	67
2.2.13.3 Potássio contido na manipueira.....	68
2.2.14 Potencial de biofertilizante do dejetto bovino.....	68
2.2.14.1 Nitrogênio contido no dejetto bovino.....	68
2.2.14.2 Fósforo contido no dejetto bovino.....	69
2.2.14.3 Potássio contido no dejetto bovino.....	69
2.2.15 Redução das emissões de CO ₂	70
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4. CONCLUSÃO.....	80
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

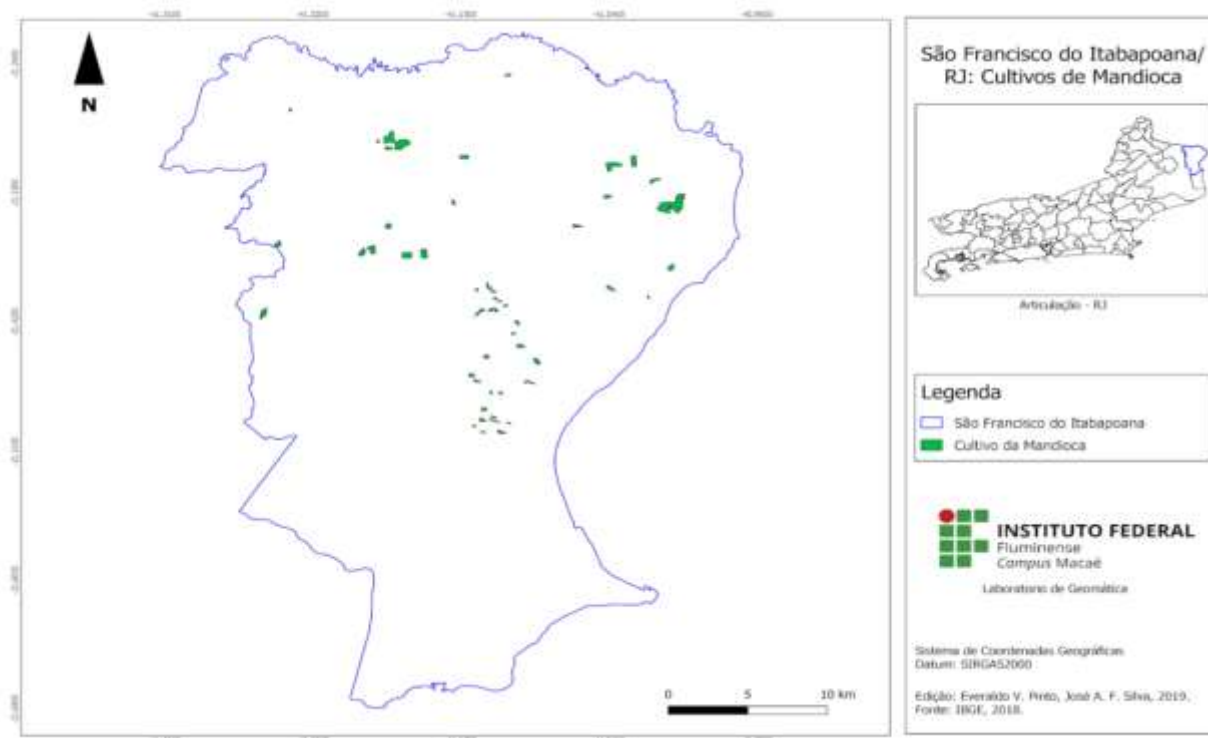
APRESENTAÇÃO

A mandioca é uma planta originária da América do Sul. O Brasil é o quarto maior produtor de mandioca do mundo, sendo um produto de elevadíssima importância socioeconômica, tanto na alimentação humana como animal (IBGE, 2018). Devido a sua adaptabilidade, é uma planta bastante cultivada em áreas onde outras espécies amiláceas não se desenvolvem com a mesma desenvoltura. A mandioca pode ser utilizada diretamente para o consumo ou destinada para a indústria na fabricação de farinha ou fécula (PASTORE, 2010).

A mandioca é cultivada em todas as regiões do Brasil tendo papel importante na geração de emprego e de renda, notadamente nas áreas pobres da Região Nordeste. A área plantada no ano de 2017 foi de 1.329.566 ha alcançando uma produção de 18.876.470 toneladas (IBGE, 2018).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de São Francisco de Itabapoana tem uma população de 41.354 habitantes com densidade demográfica de 36,84 hab/Km², com renda média mensal de 1,8 salários mínimos, taxa de escolaridade das séries iniciais e ensino fundamental é de 98% com IDEB (Índice de Desenvolvimento da Educação Básica) nos anos iniciais do ensino fundamental (rede pública) de 4,6 e nos anos finais de 3,5. O Produto Interno Bruto (PIB) per capita é de R\$ 32.220,35. O município apresenta 13% dos domicílios com esgotamento sanitário adequado e 34,7% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de São Francisco de Itabapoana é de 0,639 ocupando a penúltima posição entre os 92 municípios do estado do Rio de Janeiro e a 3312^a entre os 5.565 municípios brasileiros (IBGE, 2019a). Os principais cultivos agrícolas no município de São Francisco de Itabapoana situado no norte do estado do Rio de Janeiro são: Feijão, eucalipto, cana de açúcar, café, abacaxi, milho, mandioca e laranja. No ano de 2017 a área cultivada e/ou destinada a colheita de mandioca foi de 3200 ha respondendo o município por 30,92 % de toda produção do estado do Rio de Janeiro. A Figura 1 mostra as áreas de cultivo de mandioca no município de São Francisco de Itabapoana (IBGE, 2019b).

Figura 1. Área de plantio de mandioca no município de São Francisco de



Itabapoana/RJ.

Elaboração: (PINTO e SILVA 2019)

No ano de 1976 existia no município uma área plantada de 36.000 ha de mandioca e 150 fábricas de farinha. Em 2019, existem em torno de 30 fábricas de porte médio e 16 fábricas artesanais (mão de obra familiar) em funcionamento. Estas fábricas de porte médio produzem em média 2.500 kg de farinha processando 10 t de mandioca por dia. A redução do número de fábricas de farinha se deu pelo alto custo da mão de obra e a concorrência da farinha produzida no estado do Paraná com preço mais baixo. Além disso, as fábricas de São Francisco de Itabapoana apresentavam grande defasagem tecnológica. Com o Projeto Cadeia Produtiva da Mandioca vinculado ao programa Rio Rural e ao escritório local da EMATER, 17 fábricas estão sendo trabalhadas na adequação à legislação trabalhista, ambiental e sanitária. Oito fábricas receberam recursos do Programa Rio Rural e criaram uma associação. As demais fábricas estão se adequando com recursos próprios. (EMATER/RIO 2019)

Considerando a necessidade de se realizar o gerenciamento dos efluentes produzidos pela atividade e utilizar tecnologias em prol do meio ambiente, o presente trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade da produção de biogás a partir dos resíduos provenientes do processamento da mandioca no município de São Francisco de Itabapoana/RJ visando suprir as demandas da atividade agroindustrial.



**ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS
RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DA MANDIOCA**

***STATE OF THE ART OF BIOGAS PRODUCTION FROM WASTE
FROM CASSAVA PROCESSING***

**ADRIANO HENRIQUE FERRAREZ, EVERALDO VIEIRA PINTO,
MARCOS ANTÔNIO CRUZ MOREIRA**

RESUMO:

O cultivo de mandioca é o terceiro mais importante da região tropical depois do arroz e do milho. É produzida em mais de 90 países, principalmente da África, América Latina e Ásia. A atividade apresenta uma alta produção de efluentes com enorme potencial de poluição do meio ambiente. A produção de biogás a partir desses efluentes consiste em uma alternativa para a gestão eficiente dos resíduos minimizando o impacto ambiental. Neste trabalho foi realizada a avaliação do estado da arte da produção de biogás a partir de resíduos de mandioca. A maioria dos trabalhos avaliados apresentou resultados positivos em relação à produção de biogás com diferentes substratos para digestão anaeróbia, com ênfase na manipueira. Os estudos sobre o tema são relevantes dadas à importância econômica da mandioca, seu papel de garantidora da segurança alimentar de milhões de pessoas e a possibilidade de geração de energia a partir de seus resíduos contribuindo para a sustentabilidade da atividade.

Palavras chave: energia renovável, digestão anaeróbica, manipueira.

ABSTRACT:

Cassava cultivation is the third most important in the tropical region after rice and corn. It produces in over 90 countries, mainly from Africa, Latin America, and Asia. The activity has a high effluent production with huge potential for environmental pollution. The production of biogas from these effluents is an alternative for efficient waste management, minimizing the environmental impact. In this work, we evaluate the state of the art of biogas production from cassava residues. Most of the studies evaluated presented positive results regarding biogas production with different substrates for anaerobic digestion, with emphasis on manipueira. Studies on the subject are relevant given the economic importance of cassava, its role as guarantor of the food security of millions of people, and the possibility of generating energy from their waste contributing to the sustainability of the activity.

Keywords: renewable energy, anaerobic digestion, manipueira

INTRODUÇÃO

O cultivo de mandioca é o terceiro mais importante da região tropical depois do arroz e do milho. É produzida em mais de 90 países se apresentando como uma boa fonte de carboidratos podendo ser produzida em condições adversas ao contrário de outras culturas. O mercado global de processamento de mandioca cresceu cerca de 2,6% no período de 2011 a 2018, atingindo um volume de produção de em torno de 253,4 milhões de toneladas em 2018. A atividade representa o sustento da população em países da África, América Latina e Ásia, fornecendo alimento e renda. A maior parte da mandioca produzida é consumida diretamente e o restante é processado como amido, farinha, pellets, chips, etc. O processamento da mandioca promove a remoção de toxinas, aumenta sua vida útil, reduz seu peso e aumenta seu valor geral. Os produtos obtidos do processamento da mandioca possuem várias aplicações em vários setores, alguns dos quais incluem - alimentos, etanol, papel e papelão, têxteis, produtos farmacêuticos, colas e adesivos (RESEARCH AND MARKETS, 2019).

A manipueira é caracterizada por sua elevada concentração de material orgânico [Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)] (SILVA et al., 2009). A manipueira constitui um resíduo danoso ao meio ambiente uma vez que para cada tonelada de mandioca processada somente na fase de fabricação de farinha e amido são gerados aproximadamente 300 litros de manipueira. Este efluente tem potencial poluidor cerca de 25 vezes maior que o esgoto doméstico. Quando lançado diretamente em corpos de água provoca a alteração da capacidade de autodepuração e a eutrofização. Dependendo do tipo de processamento utilizado durante o beneficiamento da mandioca, a manipueira, pode apresentar diferentes concentrações de ácido cianídrico (HCN) e compostos tóxicos como a linamarina, que pode se combinar com a hemoglobina do sangue e bloquear o sistema respiratório (SANTOS, 2009).

Uma das alternativas para o tratamento dos resíduos da produção de mandioca é a biodigestão anaeróbia que consiste na degradação de material orgânico por meio da ação de microrganismos. A biodigestão anaeróbia dá origem a dois subprodutos, o biogás e o biofertilizante (CALDEREIRO, 2015; COSTA et al., 2016; MONTORO, 2017). O processo pode gerar benefícios: (i) ambientais (pela eliminação de resíduos dispostos de modo irregular, diminuindo a contaminação da água, do solo e do ar); (ii) sociais (evitando contato humano aos resíduos e à proliferação de pragas e outras doenças relacionadas à falta de saneamento básico); (iii) econômicos (que podem ser percebidos por meio da geração de energia renovável com uma tecnologia limpa, bem como pelo uso de biofertilizante, de grande importância para as pastagens e

adubação em geral) (BARBOSA & LANGER, 2011).

A formação do biogás ocorre em fases. A primeira fase é a hidrólise em que atuam bactérias hidrolíticas que transformam compostos orgânicos complexos, como carboidratos e proteínas, em compostos simples, como açúcares e aminoácidos. Na fase seguinte, a acidogênese, as bactérias acidogênicas agem formando álcoois, ácido lático e ácidos graxos de cadeia curta. A acetogênese inicia-se após a acidogênese, formando o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, devido a ação de bactérias acetogênicas. O último estágio se dá a formação do metano (CH_4) pela ação das arqueas metanogênicas, que são organismos estritamente anaeróbios (SALMINEN & RINTALA, 2002). A Figura 1 resume as fases da digestão anaeróbica.

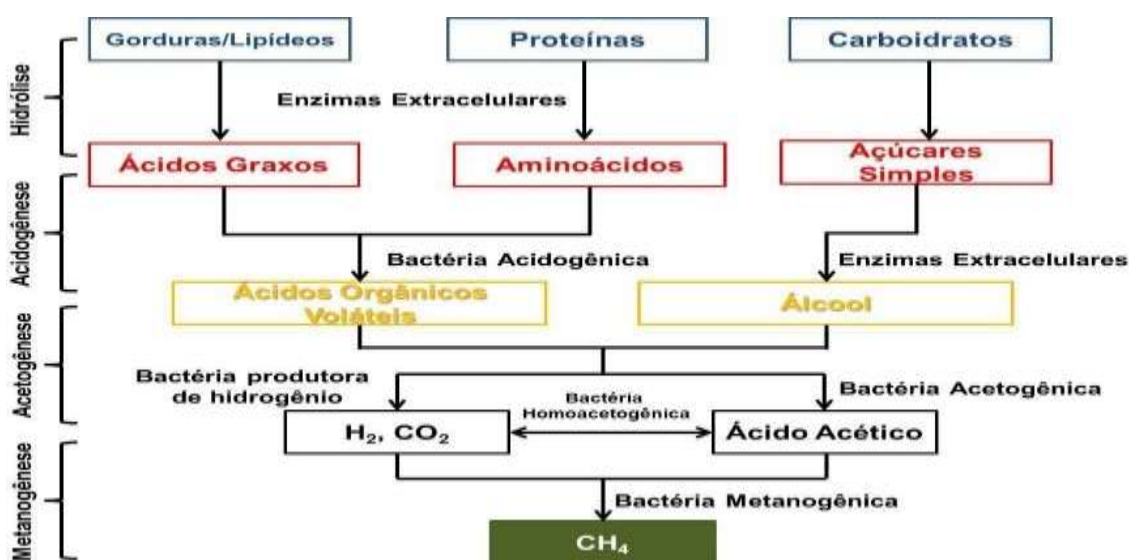


Figura 1. Esquema da digestão anaeróbica

Fonte: Adaptado de (MAO, et al. 2015; AL SEADI, 2001)

A biodigestão anaeróbia ocorre em câmaras chamadas biodigestores. O primeiro biodigestor foi construído em Bombaim na Índia em 1857, destinado à produção de gás combustível para um hospital de hansenianos. Em 1890, Cameron delineou uma fossa séptica na Inglaterra, sendo o gás produzido utilizado para iluminação pública. Com o advento da 2ª Guerra Mundial, a biodigestão anaeróbia foi extensamente disseminada nos países europeus, usando-se o biogás em substituição aos derivados de petróleo por meio da queima direta e o uso em veículos (PALHARES, 2020).

No Brasil a tecnologia dos digestores anaeróbicos teve seu maior desenvolvimento na década de 1980. Cerca de oito mil digestores, principalmente dos modelos chinês e indiano, foram instalados por meio de programa dos Ministérios da Agricultura e Minas e Energia. Mas a

tecnologia encontrou dificuldades para se consolidar levando-a a cair em descrédito no meio rural. O corte de verbas para a continuidade do programa foi o principal motivo. Outro fator foi o reduzido nível de escolaridade da maioria dos produtores brasileiros. A digestão anaeróbica envolve conhecimentos de, por exemplo, microbiologia, física e química e estes conteúdos não são abordados no ensino fundamental. Isso demandaria a realização de treinamentos e a oferta de assistência técnica periódica a estes produtores (ANDRADE et al., 2002; ALMEIDA, 2008).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o estado da arte da produção de biogás a partir dos resíduos do processamento da mandioca, partindo-se de uma revisão de literatura e chegando-se a dados bibliométricos, que segundo Mugnaini et al. (2004), são valores estatísticos, mensurados quantitativamente, baseados na produção científica.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho foi o levantamento bibliográfico, baseado em artigos científicos publicados em revistas nacionais e internacionais indexadas. Foram produzidos dados quantitativos bibliométricos a fim de caracterizar as referências bibliográficas utilizadas considerando o ano, nome da revista, país em que o trabalho foi realizado e as informações essenciais de cada artigo. Para realizar a busca dos artigos, foram consideradas algumas bases de dados, como Scielo, Scopus, Periódicos da CAPES e Google Acadêmico, baseadas nas palavras-chave: digestão anaeróbia, *anaerobic digestion*, biogás, *biogas*, mandioca, *cassava*, biodigestor, *digester*, codigestão anaeróbia, *anaerobic codigestion*, energia renovável e *renewable energy*.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Estado da arte da produção de biogás a partir dos resíduos da mandioca

Kuczman et al. (2011), avaliaram a produção de biogás utilizando a manipueira em reator de fluxo tubular horizontal de fase única considerando-se o aumento da carga orgânica e do volume de substrato introduzido no reator e sua implicação na redução do tempo de retenção hidráulica (TRH). O biodigestor foi alimentado com cargas orgânicas de 1,18; 1,28; 1,57 e 2,68 g DQO L⁻¹ rd⁻¹ (gramas de demanda química de oxigênio por litro de reator dia) em tempos de

retenção hidráulica de 15,0; 13,0; 8,3 e 6,6 dias, respectivamente. Os volumes médios de biogás produzido em $L L^{-1} rd^{-1}$ (litro de biogás por litro de reator dia) foram de 0,52 para TRH = 15 dias; 0,41 para TRH = 13 dias; 0,65 para TRH = 8,3 dias; e 0,63 para TRH = 6,6 dias. A partir dos resultados obtidos pôde-se concluir que a diminuição do TRH teve como consequência uma maior produção de biogás. O estudo mostrou que com um TRH adequado pode-se dimensionar de forma mais eficiente o volume do reator o que implica em economia na implantação da tecnologia para tratamento dos resíduos em indústrias processadoras de mandioca.

Zhang et al. (2011), estudaram a construção de um consórcio microbiano de alta degradação de celulose e aplicação deste consórcio no pré-tratamento de resíduos de mandioca com a finalidade de aumentar o rendimento de metano. Os principais parâmetros dos resíduos de mandioca obtidos por meio de três repetições foram os seguintes : sólidos totais (ST), $95,60 \pm 1,41$; sólidos voláteis (SV), $84,32 \pm 1,34$; celulose, $24,92 \pm 0,43$; hemicelulose, $17,84 \pm 0,28$; lignina, $12,28 \pm 0,22$; e nitrogênio total (NT), $1,34 \pm 0,04$ (em $mg L^{-1}$); e água residuárias: DQO, 24580 ± 258 ; NT, $288,96 \pm 12,34$; ST, $19,39 \pm 0,03$; SV, $14,12 \pm 0,11$ (em $mg L^{-1}$); e pH, $4,23 \pm 0,02$. Os métodos utilizados no trabalho foram: (i) solução de peptona celulose; (ii) consórcio microbiano com alta degradação celulósica; (iii) determinação dos microrganismos; (iv) pré-tratamento biológico; (v) e digestão anaeróbia. Os resultados, experimentais mostraram que a produção máxima de metano ($259,46 mL g SV^{-1}$) de resíduos de mandioca foi obtida por 12 h de pré-tratamento pelo consórcio microbiano, 96,63% superior ao controle ($131,95 mL g SV^{-1}$). O consórcio microbiano construído revela alta degradação de celulose, onde o papel de filtro na cultura poderia ser totalmente quebrado dentro de 48 h de incubação. A produção de lignocelulose extracelular e enzimas degradantes é desejável na hidrólise de resíduos mandioca, o que beneficia ainda mais a digestão anaeróbica. Concluiu-se que pré-tratamento biológico de resíduos de mandioca utilizando o consórcio microbiano como inóculo tem grande potencial para aumentar a produção de metano.

Suzuki et al. (2012), realizaram experimento utilizando água residuária de fécula de mandioca e cama de aviário de frango de corte com o objetivo de buscar a melhor mistura entre os resíduos gerados em grande quantidade no Brasil. Procederam aos seguintes tratamentos em seu experimento: (A) 0 % de manipueira e 100% cama de aviário; (B) 20% manipueira e 80% cama de aviário; (C) 40% manipueira e 60% cama de aviário; (D) 60% manipueira e 40% cama de aviário; (E) 80% manipueira 20% cama de aviário; (F) 100% manipueira e 0% cama de aviário. Em todos os tratamentos foram adicionados inóculos na proporção de 25 % do volume para completar o

volume final do material em biodigestão, visando equalizar as misturas. Foram utilizados biodigestores de fluxo descontínuo (batelada), com capacidade de 3,5 litros feito com cano de PVC, separadamente foram construídos gasômetros acoplados ao biodigestor por mangueiras. Os biodigestores foram inseridos em caixa d'água de 3000 litros que no seu centro continha outra caixa com capacidade de 500 litros onde foram dispostos os gasômetros a uma temperatura constante de 36° C controlada por termostato. Foi realizada análise estatísticas com os dados obtidos em cada tratamento sendo que o tratamento (A) obteve a maior produção de biogás por sólidos 0,39 litros d⁻¹, 9% a mais que o tratamento (B). O tratamento (A) se destacou também na produção específica de biogás com 0,11 litros d⁻¹ e produção de CH₄ total e específica na ordem de 21,77 litros d⁻¹ e 6,22 litros d⁻¹, respectivamente. Os autores concluíram que os substratos utilizados no estudo, apesar de sua degradação lenta, proporcionaram uma produção satisfatória de biogás.

Silva et al. (2013) avaliaram a biodigestão anaeróbia com substrato formado pela combinação de esterco ovino e caprino, manipueira e a adição de 25% de biofertilizante proveniente do mesmo substrato. Os objetivos específicos do trabalho foram: (i) monitorar o pH; (ii) quantificar a eficiência da biodigestão anaeróbia na redução de sólidos totais; e (iii) quantificar a produção de biogás. O biodigestor utilizado foi o modelo indiano, com capacidade útil de 80 litros e com tempo de retenção hidráulica de 50 dias, abastecido de forma contínua. O experimento foi realizado no Instituto Federal de Alagoas – Campus Marechal Deodoro, durante 130 dias. Os autores observaram que, com o acréscimo de 25% de biofertilizante no substrato, reduziu-se a quantidade de solução alcalina usada na correção do pH, alcançando valores de pH médio entre 7,0 e 7,85. A adição de biofertilizante proporcionou a redução global de 40,85% de sólidos totais e uma produção média semanal de 5,36 litros de biogás por kg de substrato. A biodigestão anaeróbia demonstrou ser uma alternativa eficiente para o tratamento da combinação dos resíduos orgânicos utilizados no experimento.

Moshi et al. (2014), avaliaram uma espécie selvagem de mandioca (*Manihot glaziovii*), como matéria-prima para a produção de bioenergia. Tubérculos obtidos de 3 áreas diferentes na Tanzânia foram caracterizados e avaliados para produção de bioetanol e biogás. Esses transportadores de bioenergia foram produzidos separadamente e sequencialmente e seus valores de energia avaliados com base nessas duas abordagens. A análise de composição demonstrou que a *M. glaziovii* é uma matéria-prima adequada para a produção de bioetanol e biogás. O teor de amido variou de 77% a 81%, os carboidratos estruturais de 3 a 16%, o total de proteína bruta variou de 2% a 8%. A fermentação alcançou uma concentração de etanol de até 85 g L⁻¹ com uma eficiência de fermentação de 89%. A energia dos combustíveis bioetanol e metano da mistura de

cascas de farinha variaram de 5 a 13 e 11 a 14 MJ kg SV⁻¹, respectivamente. A coprodução de bioetanol e biogás, na qual as cascas foram adicionadas ao resíduo de fermentação antes da digestão anaeróbica, implicou em um rendimento energético máximo de combustível entre 15 e 23 MJ kg SV⁻¹. Os autores concluíram que esta abordagem alcança alto conteúdo de energia e contribui para limpar o ambiente e que a otimização de processos adicionais na hidrólise e a fermentação pode melhorar ainda mais o rendimento energético.

Zhang et al. (2014), avaliaram a fermentação de bioetanol e biogás, integrado ao pré-tratamento de um consórcio microbiano celulolítico. No estudo, 8 lotes de fermentação de etanol integrados com 7 lotes de fermentação de biogás foram prosseguidos sucessivamente. A água reciclada após os dois estágios de digestão anaeróbica foi reutilizada para misturar matérias-primas nos últimos 7 lotes de fermentação com etanol, enquanto apenas água da torneira foi usada no primeiro lote. Durante o processo de reciclagem dos substratos orgânicos, ácidos graxos voláteis, nitrogênio total e amônia alcançaram estados estacionários enquanto o íon total e alcalinidade revelou uma pequena tendência de diminuição com o incremento dos lotes de reciclagem. O rendimento total e a velocidade de produção de metano de cada lote de reciclagem no sistema de acoplamento proposto chegaram a 180–206 L d⁻¹ e 40–45 L CH₄ L⁻¹ d⁻¹ (litros de metano gerados por litro de volume do reator por dia) respectivamente. Além disso, o rendimento de massa total obtido pela combinação no sistema de acoplamento proposto foi de 317 g de etanol mais 68,7 g de metano por kg de mandioca e 8,3% de energia mais alta foi gerada em comparação com o sistema de fermentação de bioetanol e de acoplamento de biogás. Concluiu-se, que a inserção de um passo de pré-tratamento biológico no sistema de acoplamento proposto apresentou vantagens com grande potencial de aplicação.

Anyanwu et al. (2015), realizaram o trabalho de revisão bibliográfica com destaque para a produção de mandioca na Nigéria nas últimas duas décadas e ao mesmo tempo estimaram a quantidade de resíduos gerados no país e seu potencial como matéria prima para a produção de biocombustíveis. Destacaram também usos industriais e globais da mandioca para recomendar uma abordagem de produção sustentável na Nigéria visando atender demandas alimentares, industriais e energéticas. De acordo com os autores, a mandioca é a terceira maior fonte de carboidratos do mundo para alimentação humana e de suma importância pois seu teor de energia é de 610 kJ/100 g de peso. A mandioca é uma cultura alimentar na Nigéria, onde se produz farinha e grânulos tostados de alta qualidade. Os autores destacaram a mandioca como cultura energética em que os resíduos de sua produção podem ser utilizados para a produção de biocombustíveis como o bioetanol e biogás.

Cheng et al. (2015), investigaram os efeitos do MHAP (pré-tratamento com aquecimento por micro-ondas), e SHAP (Pré-tratamento com aquecimento a vapor), sobre as alterações microestruturais dos resíduos de mandioca. Para determinar as propriedades físico-químicas de resíduos de mandioca após MHAP e SHAP na forma de dois estágios: processo de fermentação e fermentação de metano. Os resíduos de mandioca foram secos em estufa, moídos em malha de 0,02 mm e armazenados para uso posterior. O pré- tratamento MHAP realizado em um forno de micro-ondas obteve 5 g de resíduos de mandioca divididos em quatro reatores de politetrafluoretileno, 1,25 g de resíduos de mandioca secos foram adicionados separadamente em quatro reatores. Posteriormente foi diluído na proporção 0,05 H₂SO₄, (1,0%,v/v), ao volume combinado a 25 ml de cada reator. No aquecimento a vapor 5,0 g de resíduos de mandioca secos foram colocados em um autoclave e aquecidos a 135°C por 15 min, e depois diluído H₂SO₄ (1,0%, v / v) foi adicionado para levar o volume combinado para 100 ml. O MHAP e o SHAP são métodos eficazes para o pré-tratamento de resíduos de mandioca para melhorar a cogeração de hidrogênio e metano. O MHAP gerou numerosos microporos regulares, SHAP gerou muitos fragmentos irregulares. O MHAP causou um coeficiente de cristalinidade maior do que o SHAP, a produção de hidrogênio dos resíduos de mandioca com o MHAP foi superior ao do SHAP, demonstrando que o rendimento subsequente de metano em comparação com a energia total a eficiência de conversão aumentou para 24,7%.

Widodo et al. (2015), realizaram um estudo histórico sobre a cultura da mandioca na Indonésia analisando sua forma de plantio, sua utilização na alimentação humana, animal e a geração de energia a partir dos seus resíduos. De acordo com os autores, a produção atual de mandioca ainda não é capaz de atender a demanda mundial, indicando a redução de 1,5 milhões ha para 1,3 milhões ha. O desenvolvimento da mandioca na Indonésia foi apresentado a partir de estudos na perspectiva histórica, análises descritivas de abordagens dedutiva e indutiva foram adotadas para compartilhar descobertas. A mandioca não é uma cultura nativa da Indonésia, foi introduzida durante o início do colonialismo. Com base nos resultados registrados e discussão, o potencial biológico da mandioca, segundo os autores, fornece a solução da civilização humana especialmente no que diz respeito ao fornecimento de alimentos, ração animal e combustível. Alimentos e fertilizantes podem ser desenvolvidos no processamento da cadeia produtiva visando aumentar o valor adicional da mandioca para uma agricultura sustentável. O biogás produzido a partir da mandioca em associação com a pecuária pode beneficiar a muitos a partir de seu uso como energia renovável, evitando a emissão de metano e a diminuição do aquecimento global.

Jijai et al. (2015), estudaram o efeito dos tamanhos dos grânulos de fábrica de mandioca, fábrica de frutos do mar e de um moinho de óleo de palma sobre o desempenho dos reatores UASB

para tratamento de águas residuárias da produção de mandioca usando modelos cinéticos. Os resultados preliminares deste trabalho podem ser valiosos para o projeto e operação de usinas de biogás contínuas. Foram utilizados neste estudo três reatores UASB de escala laboratorial idênticos em cinco tempos de retenção hidráulica (TRH). Os reatores UASB eram cilíndricos em sua forma com 100 cm de altura, 5,4 cm de diâmetro interno e 2,06 L de volume de trabalho. A alimentação dos reatores foi realizada por bomba peristáltica, sendo os mesmos operados continuamente com tempos de retenção hidráulica de 5, 4, 3, 2 e 1 dias. As taxas de carregamento orgânico correspondentes foram de 3,76; 4,7; 6,27; 9,4 e 18,8 kg DQO m³d⁻¹, respectivamente. A Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), Fósforo Total (FT), Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV), Suspensos (SS), Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), alcalinidade, Ácidos Graxos Voláteis (AGV) e o pH foram analisados. A DQO estacionária diminuiu de 91,49% para 43,23% no reator R1, 89,36% para 45,13% no reator R2 e 87,23% a 32,69% no reator R3, com tempos de retenção hidráulica decrescentes de 5 dias a 1 dia. O reator R1 usou apenas grânulos da fábrica de mandioca com tamanhos médios de 1,5 a 1,7 mm que resultou em maior remoção de DQO e produção de biogás. Para os reatores R1 e R2, a eficiência de remoção de DQO tornou-se menor que 60% em 1 dia de TRH de 18,8 kg DQO m⁻³d⁻¹, enquanto que para R3 a eficiência de remoção de DQO tornou-se menor que 60% em 2 dias de TRH com de 9,4 kg DQO m⁻³d⁻¹. Além disso, como os TRHs diminuíram de 5 para 1 dias, o pH nos três reatores diminuiu de 7,2 para 5,8. As medidas de alcalinidade indicaram que a acidogênese ocorreu mais rapidamente que a acetogênese e a metanogênese. Os resultados deste estudo mostraram que os tamanhos dos grânulos afetaram o desempenho na remoção de DQO e produção de biogás em reatores UASB. Os autores constataram também que as eficiências de remoção de DQO e a produção de biogás diminuíram com a diminuição do TRH.

Andrade et al. (2016), avaliaram o processo de codigestão anaeróbica de dejetos de vacas leiteiras, aves poedeiras, suínos e ovinos com manipueira em codigestor anaeróbio semi-contínuo. O experimento foi realizado durante a estação chuvosa, com temperatura média era de 29,02 °C. Foram utilizados oito biodigestores semi-contínuo com volume útil de 7,8 L de substrato em fermentação operados com tempo de retenção hidráulica de 30 dias. Este ensaio foi realizado em duas fases, que consistiu de 35 dias de início com substrato que continham 2% de sólidos totais (ST) e 90 dias de alimentação diária com substrato que continham 4% de (ST). Todos os digestores foram mantidos em temperatura ambiente alojados livres de luz solar e chuva. Os substratos utilizados eram formados por dejetos de bovinos de leite, ovinos, aves e suínos codigeridos com manipueira. Utilizou-se na fase inicial do experimento dejetos frescos de vacas leiteiras, ovelhas,

frango de corte e suínos sendo os digestores alimentados diariamente com manipueira a uma concentração média de 5,5 % de sólidos totais (ST), com pH de 4,87, concentração total de amônia de 175 mg L^{-1} de manipueira (10%, peso) e bicarbonato de sódio (NaHCO_3) (0,5%, peso/peso). O rendimento de biogás foi calculado usando dados de produção de biogás de cada digestor e a quantidade de sólidos voláteis (SV) adicionado. As produções médias de biogás acumuladas semanalmente foram de 0,00676, 0,1167, 0,01515 e 0,01856 m^3 , para substratos formados por dejetos de vacas leiteiras, ovinos, aves e suínos codigeridos com manipueira, respectivamente. A produção de biogás para os respectivos substratos foram 0,122, 0,275, 0,535 e 0,843 $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$ de (SV). As maiores produções de biogás foram obtidas na codigestão anaeróbia de dejetos de suínos com 10 % volume de manipueira.

Glanpracha e Annachatre (2016), avaliaram a eficácia da codigestão anaeróbia da polpa de mandioca contendo cianeto com dejetos suínos variando a taxa de carregamento orgânico em escala laboratorial com reator agitado de fase única e alimentado de forma semi-contínua. Os autores investigaram o efeito do cianeto presente na polpa de mandioca na codigestão com dejetos suínos sob várias taxas de carregamento. O digestor foi operado com o substrato com relação C/N de 35. A inicialização do digestor foi aos 60 dias com carga de $0,5 \text{ kg SV m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Subsequentemente, o carregamento para o digestor foi aumentado gradualmente de 2 para 9 $\text{kg SV m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. O desempenho do digestor foi estável no carregamento entre 2 e 6 $\text{kg SV m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ com uma remoção média de sólidos voláteis e rendimento de metano de 82% e $0,38 \text{ m}^3 \text{ kg SV}^{-1}$, respectivamente. A solubilização do material particulado não ocorreu. O cianeto presente na polpa da mandioca foi degradado com sucesso, indicando que o lodo anaeróbio no digestor foi bem aclimatado ao cianeto. Os resultados mostram que a polpa de mandioca pode ser digerida com sucesso anaerobicamente com dejetos suínos como substrato sem qualquer efeito inibitório do cianeto.

Kuczman et al. (2017), avaliaram duas condições operacionais em um reator tubular horizontal piloto instalado em uma indústria de fécula de mandioca: ausência e presença de agitação. O reator foi escavado no solo com as dimensões de 10,80 m de comprimento superior, 9,80 m de comprimento inferior, 2,30 m de largura superior, 1,30 m de largura inferior e 2,10 m de profundidade. O volume total do reator foi de $33,6 \text{ m}^3$. A vedação da câmara e a construção do gasômetro foi realizada com geomembrana de polietileno de alta densidade com 1,25 mm de espessura. Uma cama de 45 sacos contendo 9.000 peças de bambu, medindo 15 cm de comprimento e 4 cm de diâmetro, foi utilizado como meio de suporte para os microorganismos. O reator foi inoculado com lodo de lagoas anaeróbicas e alimentado com a seguinte proporção

volumétrica de substratos: 10,0 : 22,6 : 1,0 (lodo: água: resíduos de mandioca), sendo avaliado o TRH de 7,0 dias. As análises para pH, DQO, SV (sólidos voláteis) e AV/AT (acidez volátil/alcalinidade total) foram realizadas de acordo com a metodologia APHA. Mesmo com uma redução de temperatura entre os níveis operacionais de 2,3 °C, uma maior redução de DQO foi evidente. A agitação melhorou o desempenho do reator piloto, promovendo o contato da biomassa-substrato, reduzindo o encrustamento no fundo e superfície, contribuindo para o fluxo de efluentes e introduzindo energia térmica na biomassa. A agitação do reator manteve a redução de DQO e a produção de biogás, reduzindo a relação AV/AT, de forma que a mesma se mostrou vantajosa em termos de estabilidade operacional.

Madeira et al. (2017), avaliaram e quantificaram valores médios de parâmetros ambientais da produção de hidrogênio a partir do biogás obtido de águas residuárias de mandioca com diferentes composições. No Brasil, os efluentes do processamento de mandioca não são tratados causando sérios problemas ambientais. O método utilizado foi baseado em uma simulação computacional do processo de produção de hidrogênio, onde os passos para realizar a simulação foram os seguintes: (i) definição dos componentes químicos do biogás - metano, hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e vapor d'água; (ii) escolha do modelo termodinâmico apropriado para o estudo. O processo de produção de hidrogênio foi avaliado considerando se o resultado do biogás obtido pela digestão de água residuárias de mandioca é ou não poluidor. A produção de hidrogênio a partir do biogás obtido de efluentes de mandioca é uma tecnologia inovadora e contribui para a mitigação do impacto ambiental. Foi utilizado um biodigestor anaeróbio com separação de fases produzindo um biogás com concentração de 71,35% de CH₄ e 28,65% de CO₂. O sistema de digestão anaeróbia piloto contínuo consistiu de dois decantadores de 500L, em série, seguidos por um reator acidogênico de 1.000L e um reator metanogênico de 3.000L. Devido a sua concentração e possibilidade de produção de energia com baixa emissão de gases, foi obtido no processo 1 maior concentração de CH₄ sendo também o menos poluidor por kg de H₂ apresentando composição de 97,14% de CH₄ e melhor eficiência energética ao passo que o processo 4 apresentou 74,25% de CH₄ com pior eficiência energética. Dessa forma, ficou determinado que o valor médio do indicador de poluição e eficiência do biogás produzido a partir de efluentes de mandioca demonstraram que a tecnologia propõe uma contribuição positiva para reduzir a emissão de gases poluentes especialmente os de efeito estufa (CO₂), agregando-se valor a cadeia produtiva da mandioca.

Sánchez et al. (2017), realizaram o experimento sobre a transformação de lagoas de tratamento de efluentes em lagoas cobertas. O processo industrial de produção da fécula de

mandioca gera efluentes muito poluentes que precisam ser tratados antes da descarga. Uma série de experiências bem-sucedidas sobre a transformação de lagoas de tratamento em lagoas cobertas foram conduzidas nos últimos anos no Brasil, provando que o uso de digestores anaeróbicos poderia tornar a indústria mundial da mandioca mais lucrativa. A abordagem da economia circular foi utilizada para adicionar o equilíbrio de gases de efeito estufa, água e uso da terra à avaliação de um conjunto de alternativas de resíduos como recursos para esse processo industrial específico. Os resultados apontam para a conveniência de atualizar a solução de lagoas cobertas para uma biorefinaria de resíduos mais completa que não apenas se concentre na geração de energia elétrica, mas também recupere o calor do processo e o biofertilizante como subprodutos. A cogeração (calor e energia elétrica) se mostrou bastante atraente para a recuperação de recursos desse resíduo agrícola. Verificou-se também que a maior eficiência que caracterizou a cogeração leva ao menor nível de emissões de gases de efeito estufa.

Carvalho et al. (2018), realizaram experimento revendo alguns aspectos sobre a produção e processamento de mandioca, introduzindo conceito de cultivo de microalgas de amostras ambientais. Avaliaram a cultura de *Chlorella minutissima*, *Spirulina platensis* e microalgas nativas em águas residuais de processamento de mandioca. O processamento de mandioca tem uma alta DQO chegando a 56 g L^{-1} com altas concentrações de nutrientes químicos. Os autores propuseram a utilização dos resíduos sólidos de mandioca em produção de pequena escala para compostagem e ração animal, ao passo que os resíduos líquidos podem ser degradados em lagoas simples ou biodigestores. Comprovaram que os resíduos do processamento possuíam DQO de 6 a 56 g L^{-1} com uma relação de C N P (carbono, nitrogênio, fósforo), em torno de 330: 30: 1 em base molar com um poder poluidor enorme. A mandioca possui cianeto na forma de glicosídeos cianogênicos, principalmente linamarina (95%) que é prejudicial à saúde animal e humana. O uso direto como fertilizante deve ser limitado, uma vez que pode levar a efeitos fitotóxicos. O mesmo vale para alimentação animal. As microalgas são capazes de crescimento autotrófico (em que se produz seu próprio alimento), e heterotrófico (necessita de obter matéria orgânica do meio externo). Dentre as espécies consideradas para o cultivo utilizando resíduos do processamento de mandioca, duas foram selecionadas: *Spirulina platensis* e *Chlorella minutissima*. O crescimento das microalgas neste resíduo foi avaliado como uma alternativa para a integração em uma biorrefinaria de mandioca para produção de alimentos e energia. O experimento realizado com as microalgas *Chlorella* e *Spirulina* constatou uma redução de 89- 99% na DQO das águas residuárias da produção de mandioca, bem como a redução de fosfato, nitrato e cianeto.

Jiraprasertwong et al. (2019), desenvolveram um processo de manta de lodo anaeróbio de

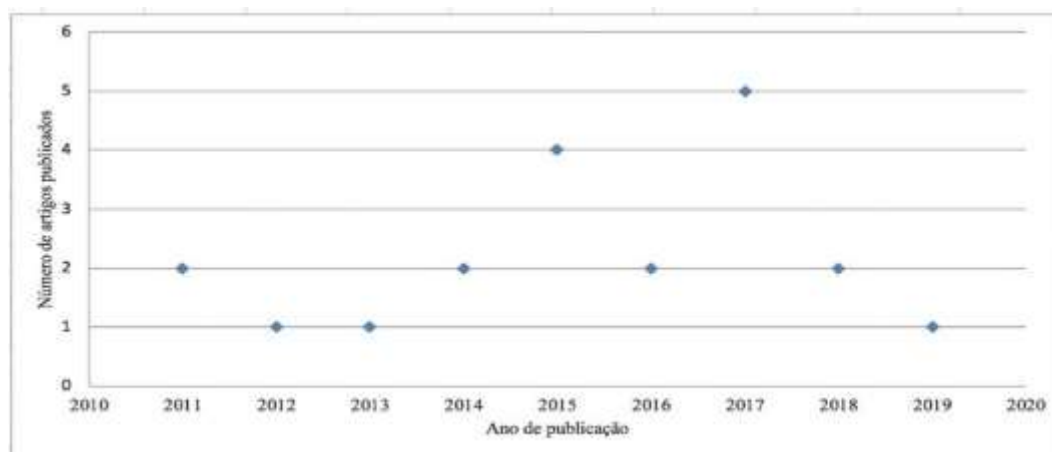
fluxo ascendente de três estágios maximizando a produção de H₂ e CH₄ a partir de águas residuárias da produção de mandioca, fornecendo condições ambientais aos três biorreatores para as fases da biodigestão anaeróbia. Os três biorreatores foram construídos a partir de vidro borossilicato com camisa de água e envoltos com folhas de borracha para inibir a atividade fotossintética de bactérias e algas. Os volumes de retenção líquidos foram 4, 10 e 24 L para o primeiro, segundo e terceiro biorreatores, respectivamente. Cada biorreator teve um espaço de cabeça de cerca de 1, 1,5 e 5 L, respectivamente. O experimento foi conduzido à temperatura mesofílica de $37 \pm 1^\circ \text{C}$ usando um banho de aquecimento circulante para fluir através dos revestimentos de água dos três biorreatores. A alimentação dos biorreatores foi realizada a razão com DQO variando de 5 a 18 kg m⁻³d⁻¹. No primeiro biorreator o pH foi definido em 5,5, enquanto que nos outros dois biorreatores o pH não foi controlado. Para uma taxa de carga de DQO ótima de 15 kg m⁻³d⁻¹, o sistema proporcionou o maior nível de remoção de DQO (92,5%) e os rendimentos de H₂ e CH₄ de 0,43 mL H₂ g DQO⁻¹ e 328 mL de CH₄ g DQO⁻¹, respectivamente. A produtividade muito elevada de CH₄ com baixa produção de H₂ resultou do lodo reciclado do terceiro biorreator para o primeiro e segundo biorreatores. O desempenho do processo do sistema UASB de três estágios em termos de taxa de remoção de DQO foi considerada ótima e o rendimento total de energia foi muito maior do que o de processos anaeróbios de um e dois estágios.

Nesta revisão foram analisados trabalhos relevantes realizados no Brasil e no exterior sobre o aproveitamento dos resíduos do processamento da mandioca. Os trabalhos apresentaram parâmetros operacionais da biodigestão anaeróbia, como TRH, pH, DQO, DBO, acidogênese e metanogênese, temperatura, agitação e outros, assim como aspectos experimentais modelos de biodigestor, variedade de substratos que podem ser utilizados na produção de biogás e diferentes proporções de mistura. A maioria dos trabalhos apresentou resultados positivos quanto à produção de biogás a partir de diferentes substratos para biodigestão anaeróbia, com ênfase na manipueira.

Dados bibliométricos

A Figura 2 mostra os dados bibliométricos referentes ao ano de publicação dos trabalhos analisados, abrangendo o período de 2000 a 2019, com maior expressividade os artigos de 2015, 2014 e 2017.

Figura 2. Artigos publicados por ano

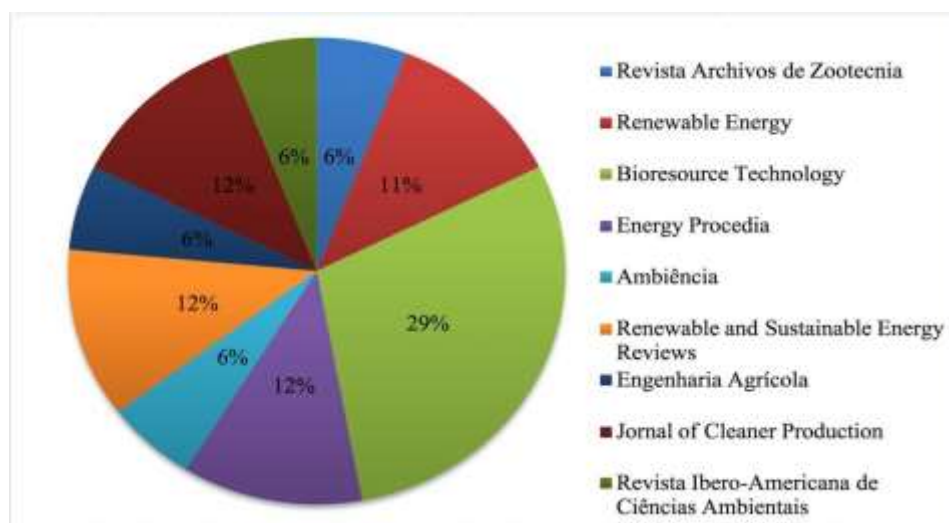


Fonte: Autores (2020)

A Figura 3 mostra as revistas nacionais e internacionais e universidades em que os trabalhos foram publicados.

Foram contabilizados 9 diferentes veículos em que os trabalhos foram publicados. O periódico “*Bioresource Technology*” publicou 5 artigos o que correspondeu a 29 %. A importância do tema produção de biogás a partir dos resíduos de mandioca pode ser aferida pela qualidade dos periódicos, com grande fator de impacto, em que os trabalhos foram publicados.

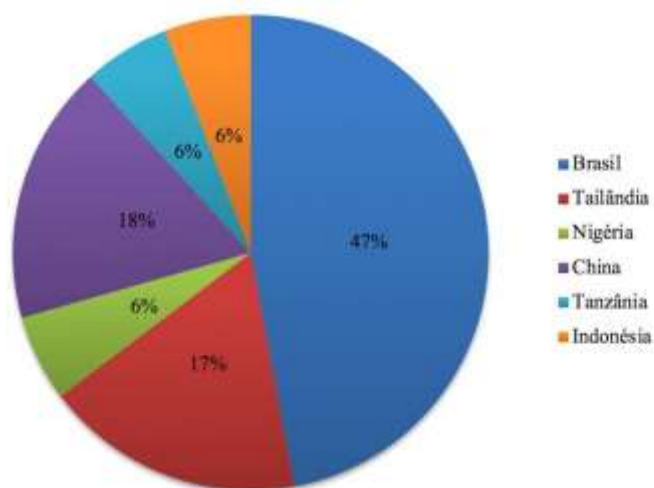
Figura 3. Revistas científicas em que os trabalhos foram publicados



Fonte: Autores (2020)

A Figura 4 mostra os países em que os trabalhos foram desenvolvidos.

Figura 4. País de origem dos trabalhos



Fonte: Autores (2020)

Observa-se na Figura 4 que 47% dos trabalhos foram desenvolvidos no Brasil, seguido por China com 18%, Tailândia com 17%, Nigéria, Tanzânia e Indonésia com 6%. Os países em que os trabalhos foram desenvolvidos coincide com os maiores produtores mundiais de mandioca, com exceção da China que devido a fatores geopolíticos e econômicos tem estudado o tema. A distribuição geográfica das pesquisas denota a preocupação dos pesquisadores na resolução dos problemas advindos dos resíduos oriundos da atividade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho comprovou a pertinência dos estudos desenvolvidos sobre o tema, haja vista a importância da produção de mandioca como atividade econômica e garantidora da segurança alimentar de milhões de pessoas, a possibilidade de geração de energia contribuir para melhoria da qualidade de vida das pessoas no entorno dos arranjos produtivos e para agregar valor à atividade. Os trabalhos avaliados nesta revisão bibliográfica foram publicados entre os anos 2011 e 2019, sendo o período entre 2014 e 2017 mais artigos foram publicados. Foram contabilizadas 9 revistas científicas em que os trabalhos foram publicados. O periódico *“Bioresource Technology”* foi o que teve maior número de artigos publicados o período. Considerando os países em que os trabalhos foram desenvolvidos, observou-se que a maioria ocorreu nos maiores produtores mundiais de mandioca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, G.V.B. **Biodigestão Anaeróbica na Suinocultura**. Trabalho de Conclusão de Curso (Medicina veterinária) - Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas, 54p, 2008.
- AL SEADI, T. **Good Practice in Quality Management of AD residues from biogas production**: Task 24 og AEA Technology Environment. 2001.
- ANDRADE, M. A. N., RANZI, T. J. D., MUNIZ, R. N., SILVA, L. G. E. S., ELIAS, M. J. **Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental**. In Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002, Campinas (SP).
- ANDRADE, W. R., XAVIER, C. A., COCA, F. O. C. G., ARRUDA, L. D. O., SANTOS, T. M. B. **Biogas production from ruminant and monogastric animal manure co-digested with manipueira**. Revista Archivos de Zootecnia, 12(251): 375-380, 2016.
- ANYANWU, C. N., IBETO, C. N., EZEHOA, S. L., OGBUAGU, N. J. **Sustainability of cassava (Manihot esculenta Crantz) as industrial feedstock, energy and food crop in Nigeria**. Renewable Energy, 81: 745-752, 2015.
- BARBOSA, G.; LANGER, M. **Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental**. Unoesc & Ciência - ACSA, 2(1): 87-96, 2011.
- CALDEREIRO, G.M.B. **Caracterização da digestão de resíduos agroindustriais em biodigestor de fluxo contínuo operado em escala real**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 90 p, 2015.
- CARVALHO, J. C., BORGHETTI, I. A., CARTAS, L. C., WOICIECHOWSKI, A. L., SOCCOL, V. T., SOCCOL, C. R. **Biorefinery integration of microalgae production into cassava processing industry: Potential and perspectives**. Bioresource Technology, 247: 1165-1172, 2018.
- CHENG, J., LIN, R., DING, L., SONG, W., LI, Y., ZHOU, J., CEN, K. Fermentative hydrogen and methane cogeneration from cassava residues: **Effect of pretreatment on structural characterization and fermentation performance**. Bioresource Technology, 179: 407-413, 2015.
- COSTA, M. S. S. M., LUCAS JR., J., COSTA, L. A. M., ORRICO, A. C. A. **A highly concentrated diet increases biogas production and the agronomic value of young bull's manure**. Waste Management, 48: 521-527, 2016.
- GLANPRACHA, N.; ANNACHHATRE, A.P. **Anaerobic co-digestion of cyanide containing cassava pulp with pig manure**. Bioresource Technology, 214: 112- 121, 2016.
- JIJAI, S., SRISIWAN, G., O-THONG, S., ISMAIL, N., SIRIPATANA, C. **Effect of Granule Sizes on the Performance of Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors for Cassava Wastewater Treatment**. Energy Procedia, 79: 90-97, 2015.
- JIRAPRASERTWONG, A., MAITRIWONG, K., CHAVADEJ, S. **Production of biogas from cassava wastewater using a three-stage upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor**. Renewable Energy, 130: 191-215, 2019.

KUCZMAN, O., GOMES, S. D., TAVARES, M. H. F., TORRES, D. G. B., ALCÂNTARA, M. S. **Produção específica de biogás a partir de manipueira em reator de fase única.** Engenharia Agrícola, 31(1): 143-149, 2011.

KUCZMAN, O., TAVARES, M. H. F., GOMES, S. D., GUEDES, L. P. C., GRISOTTI, G. **Effects of stirring on cassava effluent treatment in an anaerobic horizontal tubular pilot reactor with support medium – A Review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77: 984-989, 2017.

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

MAO, C., FENG, Y., WANG, X., REN, G. **Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 45, p. 540-555, 2015.

MONTORO, S.B. **Co-digestão de batata doce com dejetos de bovinos leiteiros: uma avaliação técnica e econômica para produção de energia e biofertilizante.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, 91p, 2017.

MOSHI, A. P., CRESPO, C. F., BADSHAH, M., HOSEA, K. M. M., MSHANDETE, A. M., ELISANTE, E., MATTIASSON, B. **Characterisation and evaluation of a novel feedstock, Manihot glaziovii, Muell. Arg, for production of bioenergy carriers: Bioethanol and biogas.** Bioresource Technology, 172: 58-67, 2014.

MUGNAINI, R.; JANNUZZI, P. M.; QUONIAN, L. **Indicadores bibliométricos da produção científica brasileira: uma análise a partir da base Pascal.** Ciência da Informação, 33(2): 123-131, 2004.

PALHARES, J. C. P. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro.** Disponível em: <<https://www.agrolink.com.br/colunistas/coluna/biodigestao->. Acesso em: 18 mai. 2020.

RESEARCH AND MARKETS. **Global Cassava Processing Market Report 2019: Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecasts 2011-2018 & 2019-2024.** Disponível em:

https://www.researchandmarkets.com/research/989m6k/global_cassava?w=1 2>, Acesso em: 18 mai.

SALMINEN, E.; RINTALA, J. **Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review.** Bioresource Technology, 83 (1): 13-26, 2002.

SÁNCHEZ, A. S., SILVA, Y. L., KALID, R. A., COHIM, E., TORRES, E. A. **Waste bio-refineries for the cassava starch industry: New trends and review of alternatives.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73:1265-1275, 2017.

SANTOS A. **Usos e impactos ambientais causados pela manipueira na microregião sudoeste da Bahia-Brasil.** In: LUZON JL; CARDIM M. (Org.). Problemas sociales y regionales em América Latina: estudo de casos. Barcelona: Universitat de Barcelona, p. 11-25, 2009.

- SILVA, I.P.M. **Sistema de Agitação Para Digestores Anaeróbios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) - Universidade de Aveiro, 50 p, 2009.
- SILVA, C. O., CEZAR, V. R. S., SANTOS, M. B., SANTOS, A. S. 2013. **Biodigestão anaeróbia com substrato formado pela combinação de esterco ovino caprino, manipueira e biofertilizante**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, 4 (1): 88-103, 2013.
- SUZUKI, A. B. P., FEIDEN, A., FERNANDES, D. M., MARTINS, G. I., FARIA, R. A. P. **Utilização de manipueira juntamente com sólidos da cama de aviário em biodigestores para geração de biogás**. Revista Ambiência, 8 (3): 809-820, 2012.
- WIDODO, Y.; WAHYUNINGSIH, S.; NEWBY, J. **Fuelling Cassava Development to Meet the Greater Demand for Food and Bio-fuel in Indonesia**. Energy Procedia, 60: 386-394, 2015.
- ZHANG, Q., HE, J., TIAN, M., MAO, Z., TANG, L., ZHANG, J., ZHANG, H. **Enhancement of methane production from cassava residues by biological pretreatment using a constructed microbial consortium**. Bioresource Technology, 100(9): 8899-8906, 2011.
- ZHANG, Q., ZHANG, L., KONG, L., YUAN, G., ZHU, X., LIU, H., WANG, Y., ZHOU, F. **Establishment and assessment of a novel bioethanol and efficient biogas coupling fermentation system integrated with the pretreatment of a cellulolytic microbial consortium**. Journal of Cleaner Production, 83: 142-150, 2014.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO E DO TEOR DE METANO DO BIOGÁS OBTIDO A PARTIR DA CODIGESTÃO DE RESÍDUOS DA MANDIOCA E DEJETO BOVINO

EVALUATION OF BIOGAS PRODUCTION AND METHANE CONTENT OBTAINED FROM THE CO-MANAGEMENT OF CASSAVA RESIDUES AND CATTLE MANURE

Everaldo Vieira Pinto - IFFluminense/PPEA

Adriano Henrique Ferrarez - IFFluminense/PPEA

Marcos Antônio Cruz Moreira – IFFluminense/PPEA

RESUMO

A agricultura e pecuária no Brasil evoluíram no decorrer das últimas décadas, viabilizando o aumento significativo da produtividade dos sistemas de produção vegetal e animal. A mandioca e a carne bovina são dois produtos de destaque na agropecuária brasileira sendo atividades que geram grande quantidade de resíduos. A raiz de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é cultivada nas mais diversas regiões do Brasil e sua produção tem sido dirigida tanto para consumo direto como para indústria de transformação. Uma das alternativas para o tratamento dos resíduos da produção de mandioca e da criação de bovinos é a digestão anaeróbica que consiste na degradação de material orgânico por meio da ação de microrganismos. O objetivo deste trabalho foi avaliar, em escala laboratorial, a produção e o teor de metano do biogás obtido a partir da codigestão anaeróbica da manipueira e dejetos bovinos. Foram realizados testes em regime de batelada em biodigestores de bancada durante 64 dias, com 6 triplicatas carregadas da seguinte forma: (i) D1 – 100% de inóculo; (ii) D2 – 100% DB; (iii) D3 – 100% M; (iv) D4 – 25% DB+ 75% M; (v) D5 – 50% DB + 50% M; e (vi) D6 – 75% DB + 25% M). Foram realizadas análises físico-químicas do substrato (afluente) e digestato (efluente) dos digestores anaeróbicos considerando-se os seguintes parâmetros: pH, condutividade elétrica (CE), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF). A redução da DBO nos digestores foi de (i) D1 de 66,16%, (ii) D2 73,29 %, (iii) D3 76,62%, (iv) D4 69,60% (v) D5 51,23% e (vi) a D6 a redução da DBO foi de 60,64%. Na DQO (i) D1 redução de 46,91 %, (ii) D2 40,14 %, (iii) D3 32,11 %, (iv) D4 55,62%, (v) D5 e 45,14% e (vi) D6 42,92%. As triplicatas que continham manipueira (D3, D4, D5 e D6) apresentaram baixa produção de biogás com baixo teor de metano, o que pode estar relacionado ao não controle de fatores pH e temperatura.

Palavras chave: energia renovável, resíduos agropecuários, sustentabilidade

ABSTRACT

*Agriculture and livestock in Brazil have evolved over the past few decades, making it possible to significantly increase plant and animal production system productivity. Cassava and beef are two outstanding products in Brazilian agriculture and generate large amounts of waste. The cassava root (*Manihot esculenta* Crantz) is grown in Brazil's most diverse regions and its production is directed both for direct consumption and for the processing industry. One of the alternatives for treating residues from cassava production and cattle breeding is anaerobic digestion, which consists of the degradation of organic material through microorganisms' action. This work's objective was to evaluate, on a laboratory scale, the production and methane content of biogas obtained from anaerobic co-digestion of manipueira (M) and cattle manure (CM). Batch tests were carried out on bench-top digesters for 64 days, with 6 triplicates loaded as follows: (i) D1 - 100% inoculum; (ii) D2 - 100% CM; (iii) D3 - 100% M; (iv) D4 - 25% CM+ 75% M; (v) D5 - 50% CM + 50% M; and (vi) D6 - 75% CM+ 25% M). Physical-chemical analyzes of the substrate (influent) and digestate (effluent) of anaerobic digesters were performed considering the following parameters: pH, electrical conductivity (EC), biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total solids (ST), volatile solids (SV) and fixed solids (SF). The reduction in BOD in the digesters was (i) D1 of 66.16%, (ii) D2 of 73.29%, (iii) D3 of 76.62%, (iv) D4 of 69.60% (v) D5 51, 23% and (vi) at D6 the reduction in BOD was 60.64%. In COD (i) D1 reduction of 46.91%, (ii) D2 40.14%, (iii) D3 32.11%, 9 (iv) D4 55.62%, (v) D5 and 45.14% and (vi) D6 42.92%. The triplicates containing manipueira (D3, D4, D5 and D6) showed low biogas production with low methane content, which may be related to the lack of control of pH and temperature factors.*

Keywords: renewable energy, agricultural waste, sustainability

1. INTRODUÇÃO

A agricultura e pecuária no Brasil evoluíram no decorrer das últimas décadas, viabilizando o aumento significativo da produtividade dos sistemas de produção vegetal e animal (CONTINI et al., 2010). A mandioca e a carne bovina são dois produtos de destaque na agropecuária brasileira e são grandes geradoras de resíduos.

A raiz de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é cultivada nas mais diversas regiões do Brasil e sua produção tem sido dirigida tanto para consumo direto como para indústria de transformação. A farinha constitui um dos principais produtos da mandioca, e seu uso é muito difundido em todo o País, fazendo parte da refeição diária de muitos brasileiros, especialmente das regiões Norte e Nordeste. A farinha de mandioca é o produto obtido pela ligeira torração da raladura das raízes de mandioca previamente descascadas, lavadas e isentas do radical cianeto. O produto submetido à nova torração é denominado farinha de mandioca torrada ao passo que a farinha de tapioca pode ser definida como um produto obtido sob a forma granulada a partir da fécula de mandioca e submetido a processo adequado (DIAS e LEONEL, 2006).

A mandioca é cultivada em todas as regiões do Brasil tendo papel importante na geração de emprego e de renda, notadamente nas áreas pobres da Região Nordeste. A área plantada no ano de 2017 foi de 1.329.566 hectares (ha), alcançando uma produção de aproximadamente 18,9 milhões de toneladas (IBGE, 2017).

A manipueira é a água residuária oriunda da etapa de prensagem da mandioca no processo de produção de farinha, e o efluente gerado na fecularia durante a extração do amido (SUZUKI et al., 2012). De acordo com Miranda et al., (2009), constitui um resíduo danoso ao meio ambiente uma vez que para cada tonelada de mandioca processada somente na fase de fabricação de farinha e amido são gerados aproximadamente 300 litros de manipueira. Além disso a manipueira é caracterizada por sua elevada concentração de material orgânico [Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)] (SILVA, 2009).

O Brasil é um dos principais produtores de carne bovina no mundo, resultado de um estruturado processo de desenvolvimento que elevou a qualidade do produto brasileiro aumentando sua competitividade e abrangência no mercado externo possui grande área territorial dedicada à bovinocultura (corte e leite) aproximadamente 180 milhões de hectares com rebanho de aproximadamente 213,5 milhões de cabeças (EMBRAPA, 2012; IBGE, 2018). O gado é produzido nos sistemas extensivo e intensivo. O sistema extensivo se caracteriza pela baixa lotação em áreas sem planejamento apropriado de lotação e disponibilidade de forragens, onde o manejo zootécnico é ausente ou pouco presente, não se preocupando com o suprimento de forragem no período da seca. É

usado em áreas recém-desbravadas, onde a produção forrageira desempenha forte pressão sobre os recursos naturais. O Sistema Intensivo incide no desenvolvimento de pastagens adubadas, artificiais, irrigadas, com forrageiras adequadas à região, propiciando a divisão dos pastos para o estabelecimento do rodízio. Envolve a melhoria da situação da alimentação, como também nas condições sanitárias, sendo consequência da redução da distância entre curral e rebanho (MARION e SEGATTI, 2012).

Uma das alternativas para o tratamento dos resíduos da produção de mandioca e da criação de bovinos é a digestão anaeróbica que consiste na degradação de material orgânico por meio da ação de microrganismos. O processo dá origem a dois subprodutos, o biogás e o biofertilizante (COSTA et al., 2016).

Na digestão anaeróbica diversos microrganismos degradam composto orgânico complexo convertendo em simples. O processo é dividido em 4 etapas, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na hidrólise as estruturas complexas são convertidas em simples proteínas em aminoácidos. Na acidogênese as estruturas resultantes do processo anterior são transformadas em dióxido de carbono, ácidos graxos, entre outros, sendo estes absorvidos por bactérias fermentativas; durante as transformações, são liberados hidrogênio (H) e dióxido de carbono (CO₂), fase chamada de acetogênese; por último, ocorre a metanogênese, nesta etapa, as bactérias são responsáveis pela conversão de ácido acético, CH₃COOH, em gás metano (CH₄). Como resultado, obtêm-se biogás e biofertilizante (CREMONEZ et al., 2013). O potencial hidrogeniônico (pH) é um dos parâmetros mais importantes a serem considerados para que ocorra de fato a digestão anaeróbica sem que haja inibição dos microrganismos, ofertando dessa maneira condições favoráveis para o sistema. A faixa ideal de pH para atuação dos microrganismos metanogênicos no processo de digestão anaeróbica é entre 6,5 e 8,0. As bactérias hidrolíticas, fermentativas e acetogênicas atuam em faixas de pH inferiores, equilibrando o pH deixando-o próximo a neutralidade (HASAN, 2016).

A codigestão anaeróbia trata-se de diferentes resíduos aptos a fermentação, misturados, para serem processados e tratados simultaneamente (AGDAG, 2007). De acordo com Jingura e Matengaifa (2009), este tipo de tratamento visa melhor desempenho na metodologia, pois teoricamente, aprimora a taxa de produção do biogás e enriquece a qualidade do biofertilizante derivado do processo. Como proposto neste projeto, a codigestão de dejetos bovino/manipueira. A manipueira possui característica ácida e quando conjunta ao dejetos bovino, pode ocasionar distúrbios que levam o sistema à falência (ANDRADE et al., 2013).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar, em escala laboratorial, a produção e o teor de metano do biogás obtido a partir da codigestão anaeróbica da manipueira e dejetos bovino.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Biogás e Energias Renováveis, (LABER), do Instituto Federal Fluminense Campus Itaperuna e no Laboratório de Solos e águas do Instituto Federal Fluminense Campus Bom Jesus do Itabapoana, no noroeste do Estado do Rio de Janeiro. A metodologia foi dividida nas seguintes etapas: (i) obtenção dos substratos; (ii) construção dos digestores de bancada; (iii) carregamento dos digestores anaeróbicos com os substratos (inóculo, manipueira e dejetos bovinos) para o carregamento dos digestores anaeróbicos (triplicatas); (iv) análise de parâmetros físico-químicos dos substratos com que os digestores anaeróbicos foram carregados; (v) leitura periódica da produção de biogás dos digestores de bancada; (vi) análise periódica do teor de metano do biogás produzido nos digestores; e (vii) análise de parâmetros físico-químicos do efluente (digestato) resultante do processo de digestão anaeróbica.

2.1. OBTENÇÃO DOS RESÍDUOS

2.1.1 Manipueira

A manipueira utilizada nesse trabalho, foi obtida em uma unidade de processamento de mandioca (Casa de Farinha) no município de São Francisco do Itabapoana, norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. A agroindústria possui capacidade de processamento diário de 02 toneladas de mandioca.

A Figura 1 mostra o processo de obtenção da manipueira por meio da prensagem da massa de mandioca e o resíduo utilizado nesse trabalho.



Figura 1 – (a) Prensagem da massa de mandioca; (b) manipueira.

2.1.2 Dejeto bovino

O dejeto bovino foi obtido no biotério de bovinocultura de leite do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – Campus Bom Jesus do Itabapoana, localizado no município de Bom Jesus do Itabapoana interior do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

A Figura 2 mostra o processo de coleta do dejeto bovino e seu armazenamento para transporte para ser utilizado nesse trabalho.



Figura 2 - Dejeto Bovino

2.2. Caracterização físico-química (teor de sólidos) dos resíduos dejeto bovino e manipeira

2.2.1. Amostras de manipeira

As amostras líquidas foram analisadas considerando a metodologia de águas, efluentes domésticos e industriais da NBR-10664 (ABNT, 1989).

De acordo com a norma, as amostras foram colocadas em cápsulas de porcelana (cadinhos) previamente calcinadas e pesadas. As amostras foram colocadas em banho maria até a secura. Após a evaporação as amostras foram levadas para estufa onde permaneceram à temperatura entre 103 a 105 °C durante 1 hora. A seguir as amostras foram levadas para um dessecador de vidro hermeticamente fechado até atingir a temperatura ambiente. Na sequência as amostras foram pesadas e o teor de sólidos totais das amostras foi calculado a partir da equação (1).

$$ST = \frac{(m_E - m_C) \times 1000}{V_A} \quad (1)$$

Em que:

ST = sólido total, em mg/L

m_C = massa do cadinho, em mg

m_E = massa após estufa, em mg

V_A = volume da amostra, em mL

A partir da determinação do teor de sólidos totais (ST) procedeu-se a determinação do teor de sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV). As amostras foram levadas para um forno tipo mufla onde permaneceram durante 1 hora a temperatura de 550°C para o processo de calcinação. Durante esse processo ocorre a volatilização das substâncias que compõem a amostra. Na sequência as mesmas foram levadas para um dessecador até atingirem a temperatura ambiente. A equação 2 mostra o cálculo utilizado para determinar o teor de sólidos fixos (SF) das amostras:

$$SF = \frac{(m_M - m_C) \times 1000}{V_A} \quad (2)$$

Em que:

SF = sólido fixo, em mg/L

m_C = massa do cadinho, em mg

m_M = massa da amostra após mufla, em mg

V_A = volume da amostra, em mL

A equação 3 a seguir mostra o cálculo utilizado para determinar o teor de sólidos voláteis (SV) das amostras:

$$SV = \text{sólido total (ST)} - \text{sólido fixo (SF)} \quad (3)$$

Em que:

SV = sólido volátil, em mg/L

2.2.2. Amostras de dejetos bovinos

As amostras de dejetos bovinos foram utilizadas in natura. Utilizou-se a metodologia de lodos e sedimentos em geral da NBR 10664 (ABNT, 1989). De acordo com a norma os resíduos foram

colocados em cápsulas de porcelana (cadinhos) previamente calcinadas e pesadas. Anotou-se o valor da massa dos resíduos e cadinhos (amostras). A seguir as amostras foram levadas para estufa de secagem onde permaneceram por 12 horas a temperatura entre 103 e 105°C. Após esse período as amostras (resíduos e cadinhos) foram levadas para um dessecador de vidro hermeticamente fechado até atingir a temperatura ambiente. Na sequência foram pesadas e o teor de sólidos totais das amostras foi calculado a partir da equação (4).

$$ST = \frac{(m_E - m_C) \times 100}{(m_{RC} - m_C)} \quad (4)$$

Em que:

% ST = sólido total, em porcentagem

m_{RC} = massa de resíduo + cadinho, em g

m_C = massa do cadinho, em g

m_E = massa após estufa, em g

A partir da determinação do teor de sólidos totais (ST) procedeu-se a determinação do teor de sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV). As amostras foram levadas para um forno tipo mufla onde permaneceram durante 1 hora a temperatura de 550 °C para o processo de calcinação. Durante esse processo ocorreu a volatilização das substâncias que compõem a amostra. Na sequência as mesmas foram levadas para um dessecador até atingirem a temperatura ambiente. A equação 5 mostra o cálculo utilizado para determinar o teor de sólidos fixos (SF) das amostras:

$$\% SF = \frac{(m_M - m_C) \times 100}{(m_E - m_C)} \quad (5)$$

Em que:

% SF = sólido fixo, em porcentagem

m_C = massa do cadinho, em g

m_E = massa da amostra após estufa, em g

m_M = massa da amostra após mufla, em g

A equação 6 a seguir mostra o cálculo utilizado para determinar o teor de sólidos voláteis (SV) das amostras:

$$\% SV = \frac{(m_E - m_M) \times 100}{(m_E - m_C)} \quad (6)$$

Em que:

% SV = sólido volátil, em porcentagem

m_C = massa do cadinho, em g

m_E = massa da amostra após estufa, em g

m_M = massa da amostra após mufla, em g

2.2.3. Medição do pH

Para realizar a medição do pH, as amostras foram dispostas em triplicatas sendo utilizado o phmetro de bancada para obtenção dos valores, seguindo a NBR 7353 (ABNT, 2019), que instrui acerca da determinação do pH com eletrodos de vidro.

2.3. CONSTRUÇÃO DOS DIGESTORES ANAERÓBICOS DE BANCADA

Foram construídos dezoito digestores anaeróbicos de bancada com materiais recicláveis e de baixo custo. Cada digestor foi composto por: (i) recipiente de polietileno de 5 L (reator anaeróbico); (ii) tubo de PVC de 60 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro; (iii) tubo de PVC de 60 cm de comprimento e 7,5 cm de diâmetro; (iv) registro para esgotamento do biogás produzido; (v) tampão (cap) de 10 cm; (vi) Tampão (cap) de 7,5 cm; (vii) mangueira transparente 5/16 de polegadas. A Figura 3 apresenta o esquema do digestor de bancada utilizado no experimento.

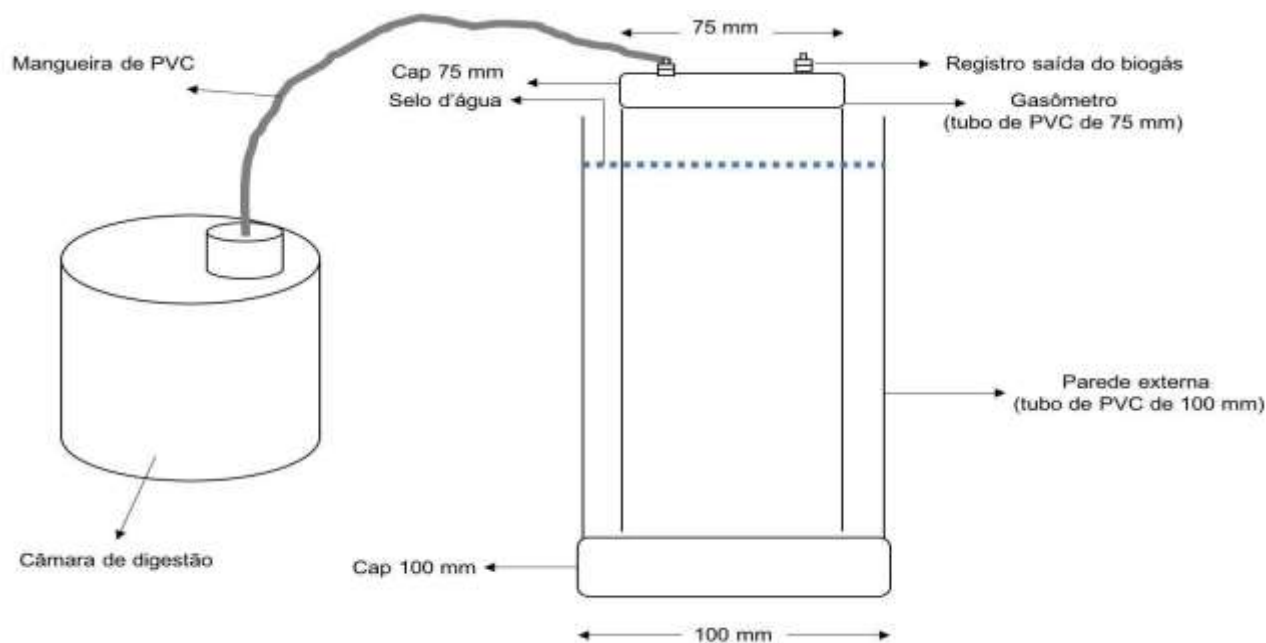


Figura 3 – Esquema do digestor de bancada

2.4. CARREGAMENTOS DOS DIGESTORES ANAERÓBICOS

Os dezoito digestores (seis triplicatas) foram carregados com diferentes proporções de mistura volume/volume (v/v) de inóculo, manipueira (M) e dejetos bovinos (DB), conforme Tabela 1 abaixo:

Triplicatas	Identificação dos digestores	Volume dos substratos	Porcentagem dos substratos
D1	D1A	Inóculo (1L)	
	D1B	Inóculo (1L)	
	D1C	Inóculo (1L)	
D2	D2A	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (1L)	100% DB
	D2B	Inóculo (1L) + Dejetos suínos (1L)	100% DB
	D2C	Inóculo (1L) + Dejetos suínos (1L)	100% DB
D3	D3A	Inóculo (1L) + Manipueira (1L)	100% M
	D3B	Inóculo (1L) + Manipueira (1L)	100% M
	D3C	Inóculo (1L) + Manipueira (1L)	100% M
D4	D4A	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (0,25L) + Manipueira (0,75L)	25% DB + 75% M
	D4B	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (0,25L) + Manipueira (0,75L)	25% DB + 75% M
	D4C	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (0,25L) + Manipueira (0,75L)	25% DB + 75% SL
D5	D5A	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (0,5L) + Manipueira (0,5L)	50% DB + 50% M
	D5B	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (0,5L) + Manipueira (0,5L)	50% DB + 50% M
	D5C	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (0,5L) + Manipueira (0,5L)	50% DB + 50% M
D6	D6A	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (0,75L) + Manipueira (0,25L)	75% DB + 25% M
	D6B	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (0,75L) + Manipueira (0,25L)	75% DB + 25% M
	D6C	Inóculo (1L) + Dejetos bovinos (0,75L) + Manipueira (0,25L)	75% DB + 25% M

O inóculo utilizado no experimento foi retirado de um digestor em operação.

Os digestores foram operados em batelada, sem controle de temperatura (sob temperatura ambiente) com um tempo de retenção hidráulica (TRH) total de 64 dias.

A Figura 4 mostra a montagem do experimento com os 18 digestores de bancada.



Figura 4 – Digestores de bancada utilizados no experimento.

2.5. ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO SUBSTRATO (AFLUENTE) E DO DIGESTATO (EFLUENTE) NAS TRIPLICATAS.

Os substratos utilizados no carregamento dos digestores anaeróbicos foram submetidos a análises físico-químicas, contemplando pH, condutividade elétrica (CE), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF). Os métodos utilizados foram baseados na APHA (1998) e ABNT 10664 (mesma metodologia utilizada na análise da manipueira), seguindo o protocolo padrão.

O pH foi mensurado a partir de phmetro digital de bancada microprocessado marca DEL

LAB, mostrado na Figura 5.



Figura 5 - Phmetro de bancada digital

A condutividade elétrica foi determinada por meio do equipamento medidor de condutividade digital de bancada marca DEL LAB, mostrado na Figura 6.



Figura 6 - Condutímetro de bancada

Para determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) foi utilizado o método de incubação por cinco dias a 20°C, com os seguintes equipamentos: kit oxitop, frascos, bandeja agitadora, incubadora e vidrarias.

A Figura 7 mostra a montagem do experimento para a determinação da DBO.



Figura 7- Analisador de DBO 5 dias

Para a determinação da demanda química de oxigênio (DQO) foi utilizado o método de colorimetria após refluxo fechado. O método consiste na oxidação da matéria orgânica na amostra em uma mistura fervente de ácidos crômico e sulfúrico com um excesso conhecido do agente oxidante, o dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$). A homogeneização da amostra ocorre com o auxílio de uma pipeta para transferir 2,5 mL do digestato para o tubo (resultado da análise depende de uma boa homogeneização). A seguir é adicionado 1,5 mL da solução digestora e, cuidadosamente, adiciona-se 3,5 mL da solução de ácido sulfúrico / sulfato de prata. A seguir o tubo deve ser tampado e invertido algumas vezes para homogeneização. Na sequência o tubo deve ser inserido no termoreator e mantido a $150 \pm 2^\circ C$ por duas horas. Após esse processo, o tubo deve ser resfriado a temperatura ambiente, inverter algumas vezes e esperar a sedimentação de quaisquer sólidos. Efetuar a leitura da DQO em espectrofotômetro a 600 nm e comparar com a curva de calibração preparada.

A Figura 8 mostra a montagem do experimento para a determinação da DQO.

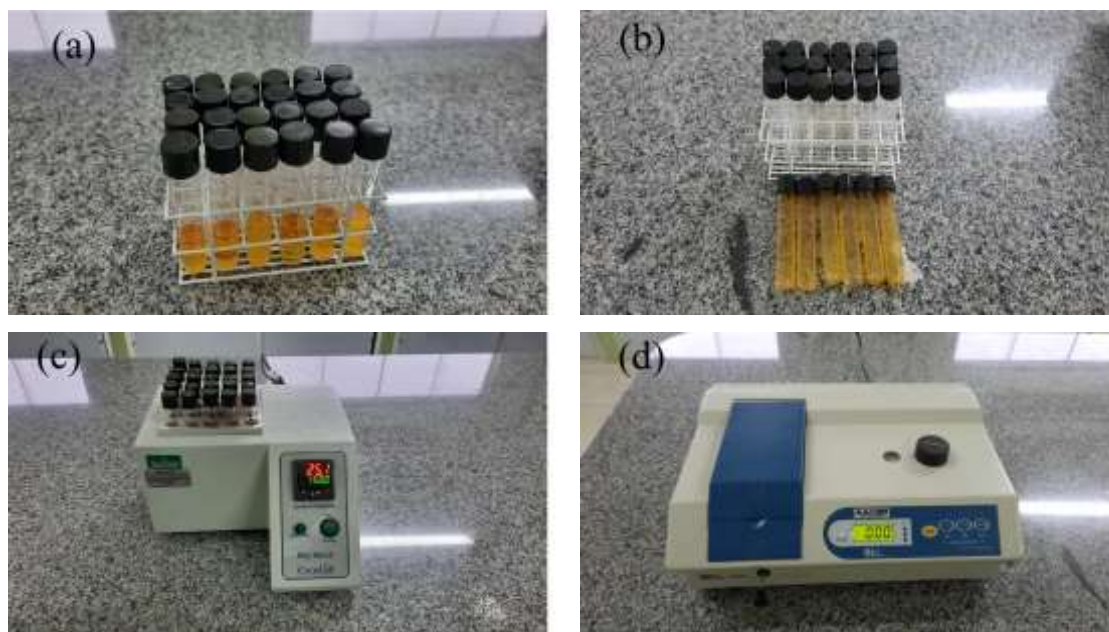


Figura 8- (a) Tubo com solução para análise de DQO; (b) Tubos preparados para introdução no bloco digestor; (c) bloco digestor DQO 25 provas/ termoreator/ Dry-block; e (d) espectrofotômetro digital

2.6. LEITURA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A produção de biogás foi aferida duas vezes por semana, durante o período de 64 dias. O método utilizado para a aferição do volume de biogás produzido foi pelo deslocamento do gasômetro.

A medição da produção de biogás foi realizada a partir do deslocamento vertical do tubo de PVC de 7,5 cm. A área da base do gasômetro (tubo de 7,5 cm) foi calculada pela equação (1).

$$A = \pi R^2 \quad (1)$$

em que:

A – área da base do gasômetro, cm^2 ;

R – raio do gasômetro, cm.

O volume de biogás produzido foi calculado a partir da equação (2).

$$V_{\text{biogás}} = A h \quad (2)$$

em que:

$V_{\text{biogás}}$ – volume de biogás produzido, cm^3 ;

A – área da base do gasômetro, cm^2 ;

h – deslocamento do gasômetro, cm.

2.7. ANÁLISE DO TEOR DE METANO DO BIOGÁS

O teor de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2), gás Sulfídrico (H_2S) e monóxido de carbono (CO) foi medido por meio de um analisador de biogás da marca Sewerin modelo Multitec 545, mostrado na Figura 9.



Figura 9 – Analisador de biogás

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO SUBSTRATO (AFLUENTE) E DO DIGESTATO (EFLUENTE) NAS TRIPLICATAS

A Tabela 2 apresenta os valores médios obtidos da análise dos parâmetros físico-químicos pH, condutividade elétrica (CE), turbidez e oxigênio dissolvido dos substratos em cada triplicata.

Tabela 2 – Valores médios de parâmetros físico-químicos do afluente (AF) e efluente (EF) em cada triplicata

Triplicata	pH		Condutividade Elétrica (CE) mS/cm 25° C	
	AF	EF	AF	EF
D1	7,07	7,38	4,03	4,63
D2	6,66	7,33	3,82	5,33
D3	4,95	5,18	1,83	8,73
D4	5,42	6,13	5,22	5,19
D5	5,16	5,96	6,09	5,97
D6	4,73	5,63	6,94	7,56

O pH médio nos digestores das triplicatas D1 e D2 aumentou durante o processo de digestão anaeróbica estando dentro da faixa ideal. Nas triplicatas D3, D4, D5 e D6, mesmo com aumento no valor do pH do afluente para o efluente, esse parâmetro permaneceu abaixo de 7 caracterizando acidez portanto, inadequado para o processo anaeróbico.

A condutividade elétrica (CE) é um parâmetro importante pois, de acordo com Prazeres et al. (2012), ela afeta a estrutura do solo. Se esse parâmetro estiver alto pode haver a diminuição da extensão de aeração e da infiltração da água. A (CE) média aumentou nas triplicatas D1, D2, D3 e D6 o que pode estar relacionado à formação de íons como o acetato, composto que precede a fase metanogênica e pelo aumento do pH, que resulta na formação de alguns outros íons como NH_4^+ (DAMIANOVIC e FORESTI, 1992; MATA-ALVAREZ et al., 2000). Nas triplicatas B4 e B5 a CE diminuiu. De acordo com Astals et al. (2013), não existe atualmente um valor limite desse parâmetro para o uso agrícola dos digestatos.

A Tabela 3 apresenta os valores médios obtidos da análise de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) do afluente (AF) e efluente (EF) em cada triplicata.

Tabela 3 – Valores médios de ST, SF e SV do afluente (AF) e efluente (EF) em cada triplicata.

Triplicata	Sólidos Totais (mg/L)		Sólidos fixos (mg/L)		Sólidos voláteis (mg/L)	
	AF	EF	AF	EF	AF	EF
D1	436,49	41,18	13,76	9,17	422,73	32,01
D2	451,20	49,59	16,60	10,36	434,60	39,23
D3	339,51	33,11	12,9	7,83	326,60	25,28
D4	409,31	29,51	12,86	6,53	396,44	22,97
D5	528,81	50,96	15,61	9,44	513,20	41,51
D6	542,81	31,68	13,04	7,67	529,77	24,00

Na triplicata D1 observou-se que o processo de digestão anaeróbica reduziu o teor de ST dos resíduos em 90,56%, o teor de SF em 33,36% e de SV em 93,43%.

A redução de ST, SF e SV dos resíduos para a triplicata D2 com a digestão anaeróbica foi de 89,00%, 37,59% e 90,97%, respectivamente.

Na triplicata D3 foi constatada uma redução de 90,25% no teor de ST, 39,20% no teor de SF e 92,05% no teor de SV.

Na triplicata D4 observou-se que o processo de digestão anaeróbica reduziu o teor de ST dos resíduos em 92,83%, o teor de SF em 49,23% e de SV em 94,211%.

A redução de ST, SF e SV dos resíduos para a triplicata D5 com a digestão anaeróbica foi de 90,36%, 39,71% e 91,92%, respectivamente.

Na triplicata D6 foi constatada uma redução de 94,16% no teor de ST, 41,195 no teor de SF e 95,47% no teor de SV.

Observou-se uma redução considerável dos teores de sólidos totais, fixos e voláteis entre o afluente e efluente nas triplicatas avaliadas o que comprova a eficácia da codigestão anaeróbica para o tratamento da manipueira e dejetos bovinos sendo obtidos os seguintes resultados comparando-se a redução em função do TRH respectivamente chegando aos valores de redução descritos 15 dias de TRH, 55,55 mg/L ST e 64,04 de SV, aos 22 dias de TRH 71,71 mg/L ST e 76,29 mg/L SV, aos 29 dias de TRH 66,77 mg/L de ST e 70,82 mg/L de SV e aos 36 dias de TRH 66,26 mg/L de ST e 70,34 mg/L SV . (Itodo e Awulu, 1999; Orrigo Jr. et al.,2010).

Cremonez et al. (2015), avaliaram a codigestão anaeróbica da vinhaça, obtida da produção do etanol hidratado, e dejetos suínos obtendo uma redução de 29,9% do teor de SV, 17,98% do teor de ST e 2,52% de teor de SF, para o reator termicamente controlado e 25,4% do teor de SV do reator a temperatura ambiente.

A Tabela 4 apresenta os valores médios obtidos para a DBO do afluente (AF) e efluente (EF) em cada triplicata.

Tabela 4 – Valores médios de DBO do afluente e efluente em cada triplicata

Triplicata	DBO afluente (mg/L)	DBO efluente (mg/L)
D1	6.933	2.346
D2	12.080	3.226
D3	11.173	2.612
D4	9.120	2.772
D5	11.040	5.384
D6	9.146	3.600

Os digestores da triplicata D1 (inóculo) apresentaram uma redução na DBO de 66,16%. Os digestores da triplicata D2 apresentaram redução da DBO 73,29 %, valores esses condizentes aos encontrados na literatura obtidos por Queiroz et al. (2018) e Fernandes (2016).

Na triplicata D3, a redução da DBO sofreu redução de 76,62%, decréscimo menor que o obtido por Pinto (2008) ao analisar o tratamento da manipueira em digestor anaeróbico que foi de aproximadamente 90%.

Na triplicata D4 a redução da DBO média foi de 69,60%. Nos digestores da triplicata D5 a redução da DBO foi de 51,23%. Na triplicata D6 a redução da DBO foi de 60,64%.

Considerando-se a Resolução CONAMA 430/2011 que estabelece a remoção mínima de DBO 60% para lançamento de efluente em corpo hídrico (BRASIL, 2011), tem-se que apenas as triplicatas D3, D4 e D6 (que continham manipueira no substrato) atenderam à legislação.

A Tabela 5 apresenta os valores médios obtidos para a DQO do afluente (AF) e efluente (EF) em cada triplicata.

Tabela 5 – Valores médios de DQO afluente (AF) e efluente (EF) em cada triplicata.

Triplicata	DQO afluente (mg/L)	DQO efluente (mg/L)
D1	14.213	7.546
D2	16.280	9.746
D3	17.920	12.166
D4	25.250	11.206
D5	19.833	10.880
D6	17.266	11.726

Na triplicata D1 a DQO apresentou uma redução de 46,91 %. Nos digestores da triplicata D2 ocorreu uma redução de 40,14 % na DQO. Os digestores da triplicata D3 apresentaram redução na DQO de 32,11 %. Na triplicata D4 a redução da demanda química de oxigênio foi de 55,62%. Nas triplicatas D5 e D6 a redução da DQO foi de 45,14% e 42,92%, respectivamente. A resolução CONSEMA/RS (Conselho Estadual do Meio Ambiente – Rio Grande do Sul) 355/2017 estabelece padrões de lançamento de efluentes oriundos de fontes poluidoras, exceto efluentes sanitários em corpos hídricos por faixa de volume variando de 100 m³/d até 10.000 m³/d com valores de DQO variando de 330 mg/L a 150 mg/L, respectivamente.

3.2. PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A Figura 10 apresenta a produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D1.

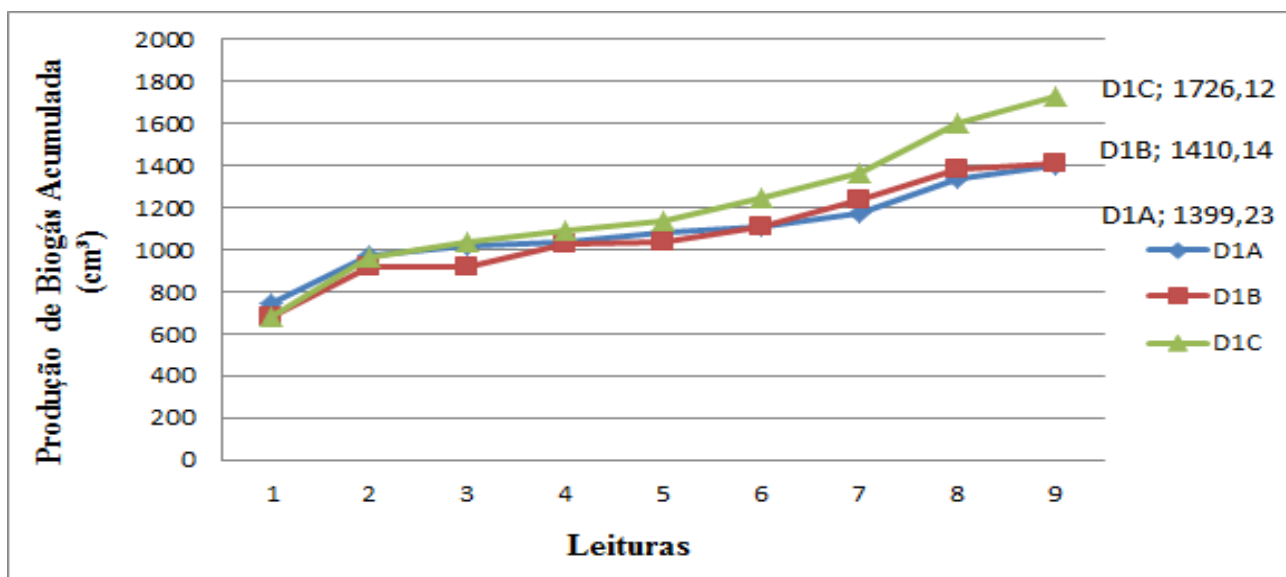


Figura 10 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D1.

A produção acumulada de biogás na triplicata D1 foi praticamente a mesma nos três digestores até 7ª leitura, a partir de então o digestor D1C produziu um pouco mais de biogás que D1A e D1B. Observou-se que a produção acumulada média de biogás na triplicata D1 foi baixa, o que condiz com o fato dos digestores conterem material que já havia sido digerido (inóculo). A

Figura 11 apresenta a produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D2.

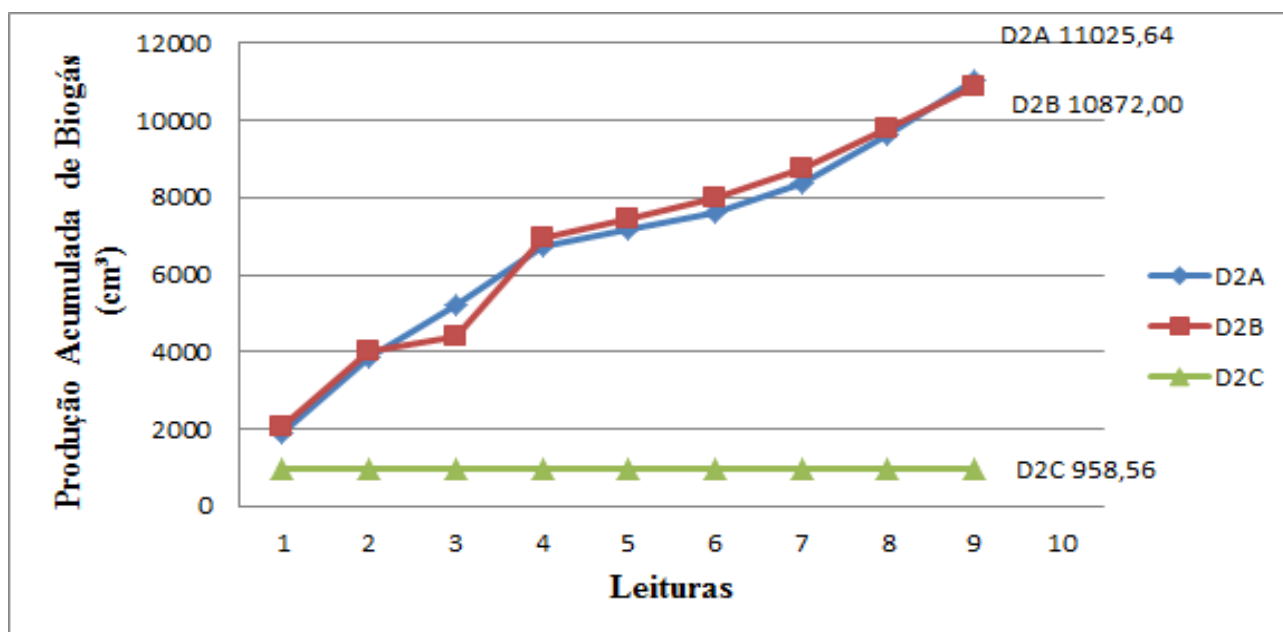


Figura 11 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D2.

Os digestores D2A e D2B tiveram produção de biogás bastante similar no decorrer do experimento. O digestor B2C produziu biogás apenas na 1ª leitura. Vistoriou-se o digestor D2C a procura de eventuais vazamentos, mas os mesmos não foram encontrados. Uma possível explicação para a não produção de biogás em D2C pode estar no fato dos consórcios de microrganismos não terem se efetivado.

A Figura 12 apresenta a produção de biogás acumulada nos digestores triplicata D3.

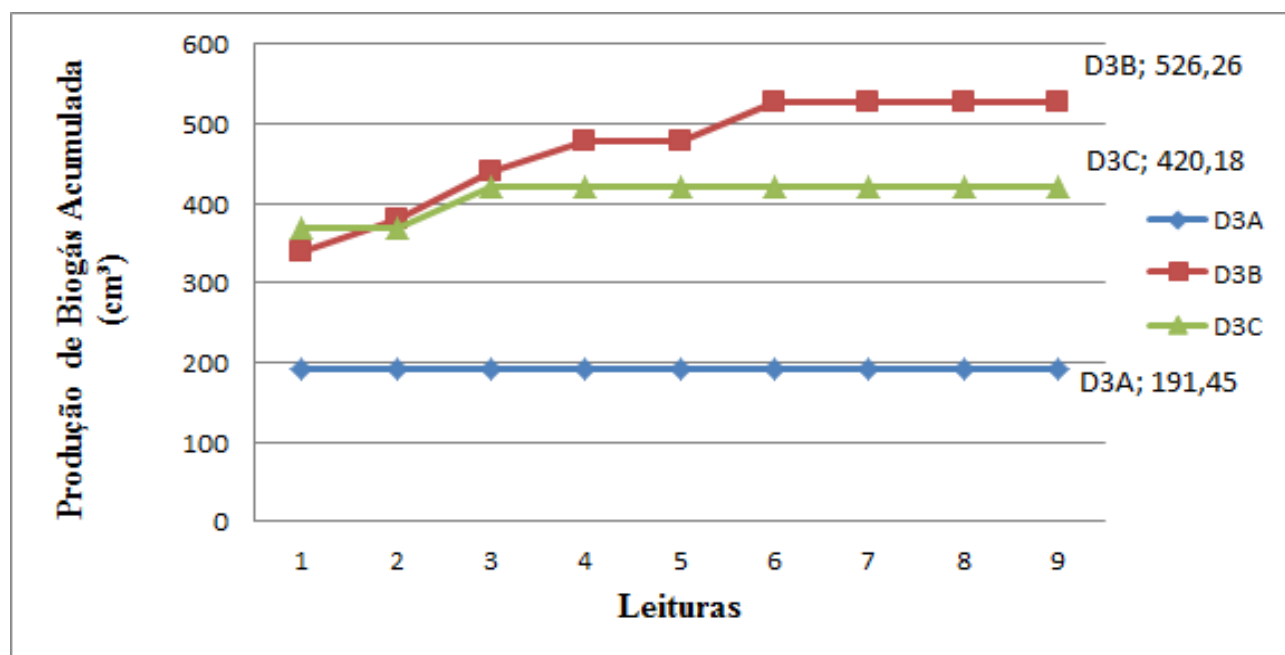


Figura 12– Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D3.

O digestor D3A produziu biogás somente na 1ª leitura. No digestor D3B a produção aumentou até a 4ª leitura estagnado até a 5ª, voltando a aumentar até a 6ª leitura, e parando de produzir até o final do experimento. No digestor D3C foi verificada produção de biogás na 1ª leitura, nenhuma produção na 2ª leitura, pequena produção até a 3ª e produção nula nas leituras seguintes.

Um dos fatores que pode ter contribuído para a baixa produção de biogás pode ter sido o pH do substrato na triplicata cujos valores médios estiveram fora da faixa ideal para a digestão anaeróbica.

A Figura 13 apresenta a produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata -D4.

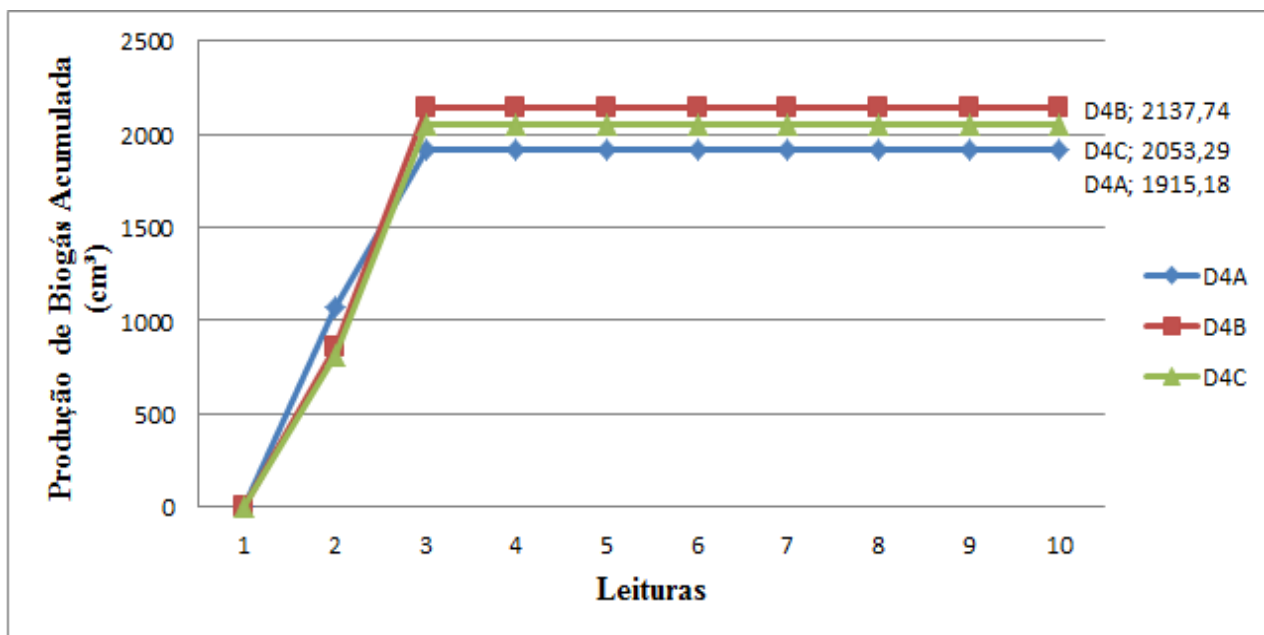


Figura 13 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D4.

Até a 3ª leitura o desempenho dos digestores da triplicata D4 foi parecida, a partir de então todos eles pararam de produzir biogás. O ocorrido nos digestores pode estar associado ao pH impróprio para o processo anaeróbico conforme os valores médios aferidos que se apresentaram fora da faixa ideal.

A Figura 14 apresenta a produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D5.

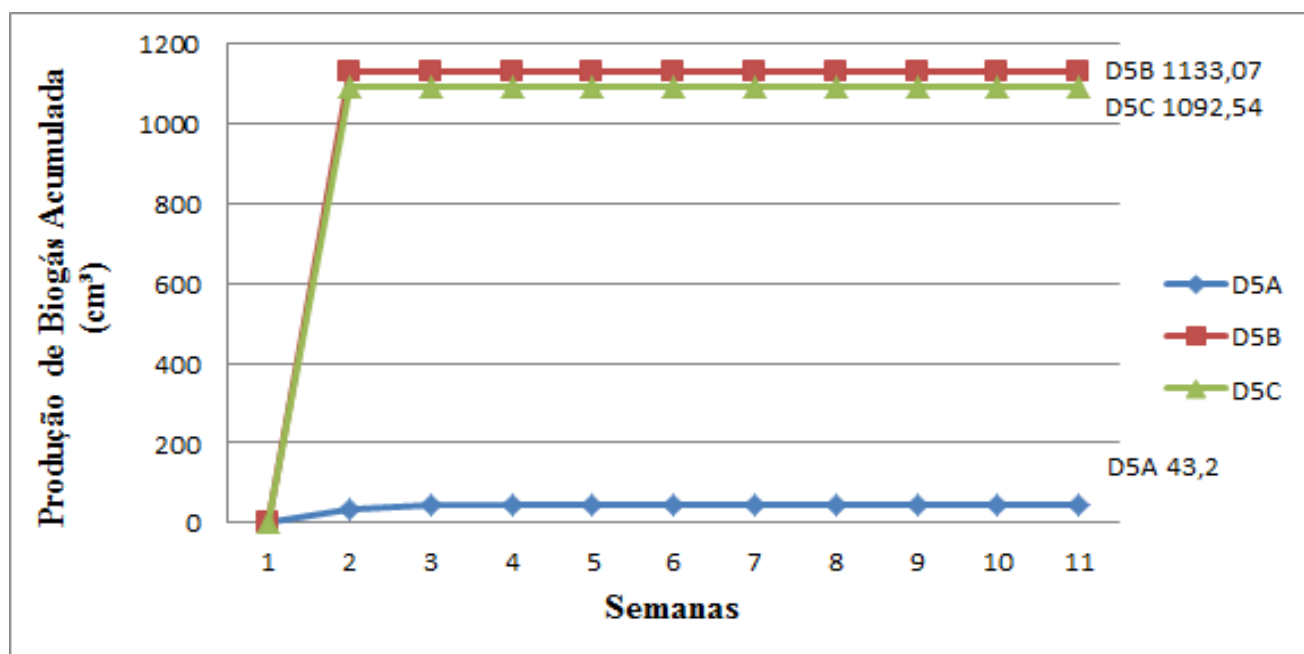


Figura 14 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D5.

Na 1ª leitura nenhum dos digestores da triplicata D5 produziu biogás. Na 2ª leitura os digestores D5B e D5C apresentaram produção muito próxima e desde então pararam de produzir biogás até o final do experimento. O digestor D5A apresentou produção muito pequena entre a 1ª e 2ª e desta até a 3ª leitura, cessando completamente a produção de biogás até o final do experimento. O pH fora da faixa ideal para a digestão anaeróbica pode ser a explicação para o baixo desempenho dos digestores na triplicata

A Figura 15 apresenta a produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata -D6.

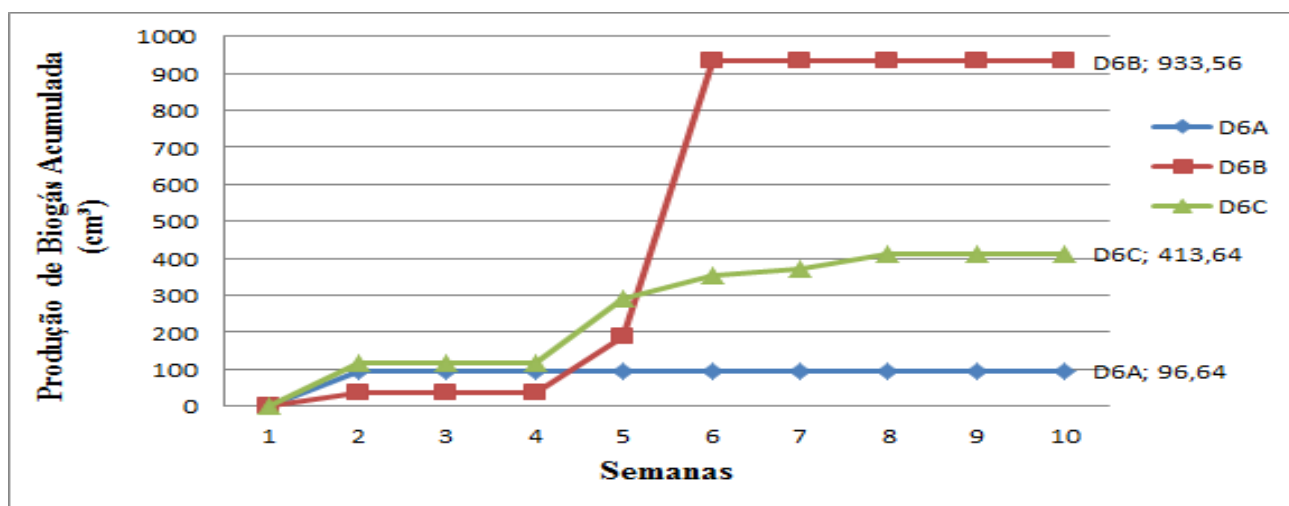


Figura 15 – Produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D6.

A produção de biogás acumulada nos digestores da triplicata D6 foi baixa. Não havendo produção em nenhum deles na 1ª leitura. A partir daí o desempenho dos digestores não teve um padrão definido. Esse comportamento pode ser explicado pelo pH fora da faixa ideal para o processo de digestão anaeróbica. A Figura 16 apresenta a produção média acumulada de biogás nas triplicatas.

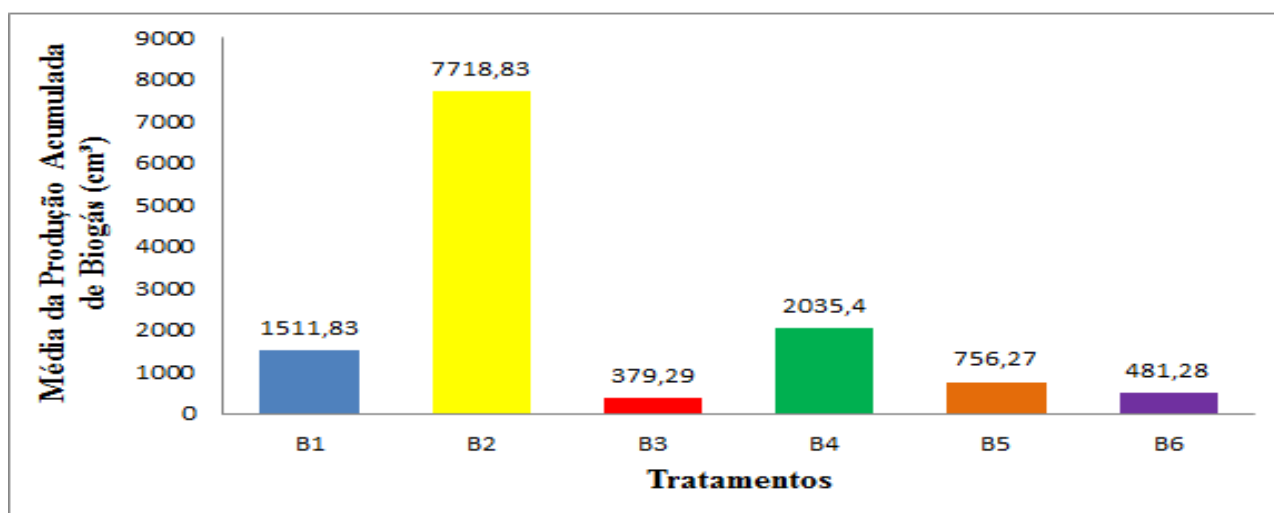


Figura 16 – Produção média acumulada de biogás nas triplicatas

A triplicata D2 apresentou o melhor desempenho no quesito produção média acumulada de biogás. As triplicatas em que foi proposta a codigestão de dejetos bovinos com a manipueira, com exceção da triplicata D4, apresentaram produção média acumulada menor que a triplicata controle (D1). Com base nos resultados deste trabalho a produção de biogás a partir da manipueira se mostrou inviável.

3.3 ANÁLISE DO TEOR DE METANO DO BIOGÁS PRODUZIDO

A Figura 17 apresenta o teor de metano (CH_4) no biogás produzido nos digestores da triplicata D1.

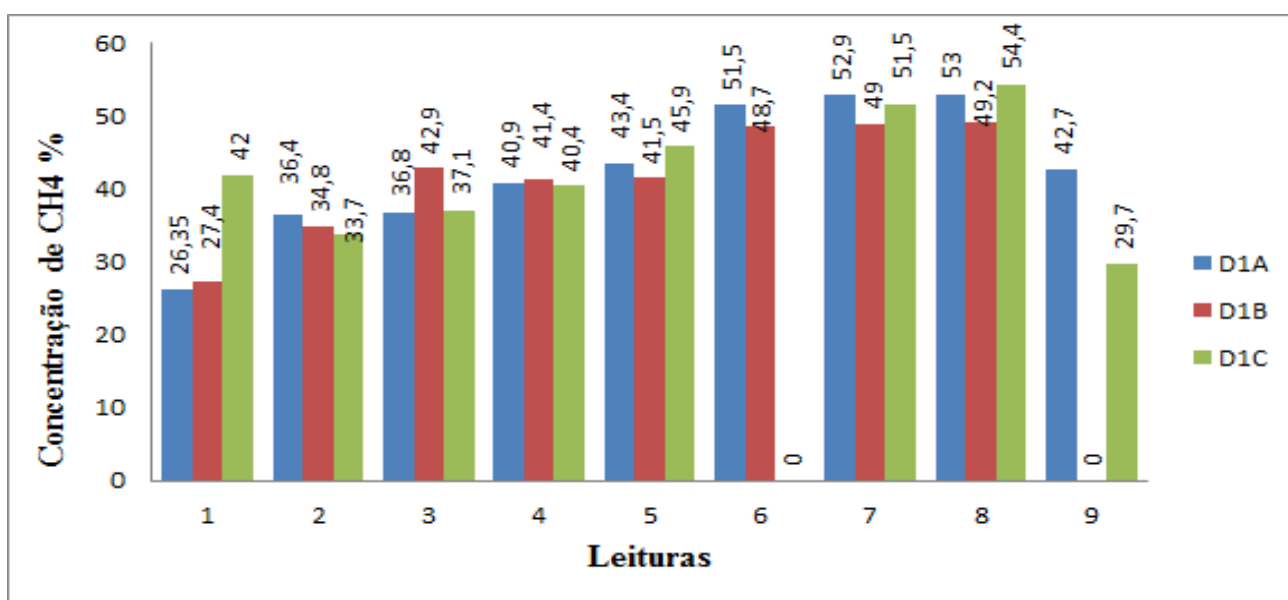


Figura 17 – Teor de CH_4 do biogás produzido nos digestores da triplicata D1.

Apesar de ter produzido uma pequena quantidade de biogás, observou-se que o teor de CH_4 na triplicata D1 foi relativamente alto. O digestor D1A apresentou teor de CH_4 em todas as leituras, em conformidade com a Figura 10, com concentração máxima de 53% na 8ª leitura. O digestor D1B apresentou teor de CH_4 nulo na 9ª leitura e concentração máxima de 49,2% na 8ª medição. O digestor D1C apresentou teor de CH_4 igual a 54,4% na 8ª leitura e concentração nula na 6ª medição.

A Figura 18 apresenta o teor de metano (CH_4) no biogás produzido nos digestores da triplicata D2.

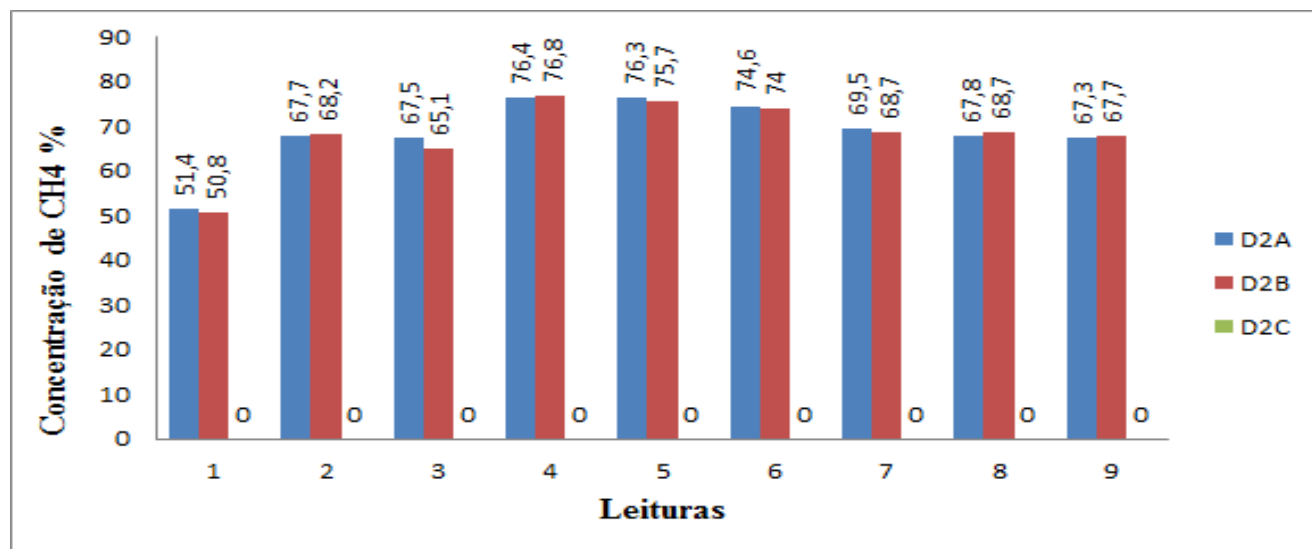


Figura 18 – Teor de CH_4 do biogás produzido na triplicata B2.

A triplicata D2 apresentou o melhor desempenho na produção de biogás e os maiores teores de CH_4 . Os digestores D2A e D2B apresentaram teor de CH_4 em todas as leituras. As concentrações máximas em D2A e D2B ocorreram na 4ª medição e foram de 76,4% e 76,8%, respectivamente. O digestor D2C não apresentou concentração de CH_4 em nenhuma leitura.

A Figura 19 apresenta o teor de metano (CH_4) no biogás produzido nos digestores da triplicata D3.

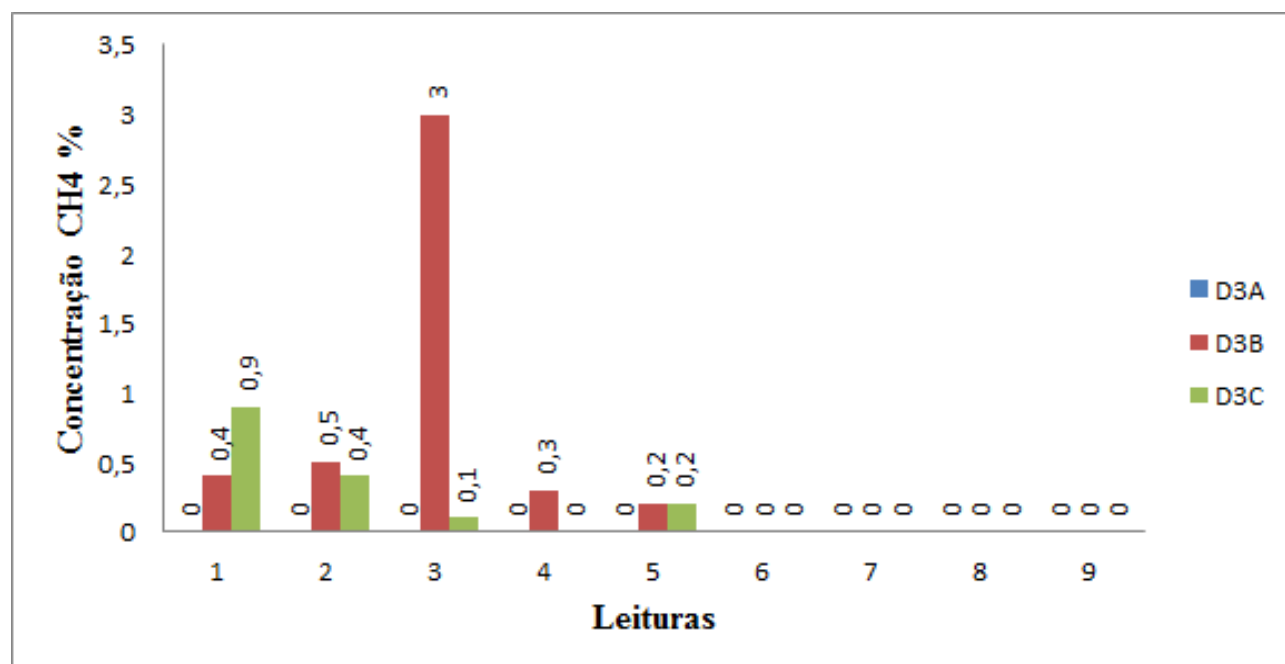


Figura 19 – Teor de CH_4 do biogás produzido na triplicata D3.

O digestor D3A não apresentou teor de CH_4 na única leitura em que teve produção de biogás (1ª). O digestor D3B apresentou baixa concentração (máximo de 3%) de CH_4 até a 5ª leitura e valores nulos a partir daí até o final do experimento. A concentração de CH_4 no digestor D3C foi nula na 4ª, 6ª, 7ª, 8ª e 9ª leituras e não passou de 0,9% nas demais.

A Figura 20 apresenta o teor de metano (CH_4) no biogás produzido nos digestores da triplicata D4.

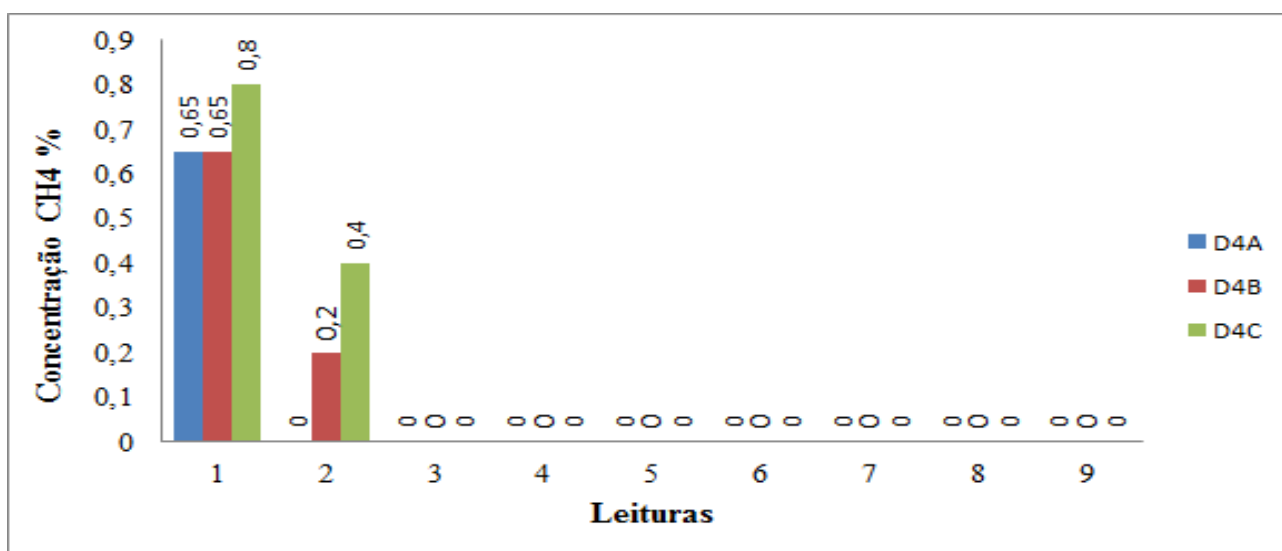


Figura 20 – Teor de CH_4 do biogás produzido na triplicata D4.

Na 1ª leitura todos os digestores da D4 apresentaram teores de CH_4 no biogás produzido, embora bastante baixos. O digestor D4A não voltou a apresentar concentração de CH_4 nas demais medições. Os digestores D4B e D4C apresentaram teor de CH_4 também baixíssimos na 2ª leitura e a partir daí concentração nula desse gás.

A Figura 21 apresenta o teor CH_4 no biogás produzido nos digestores da triplicata D5.

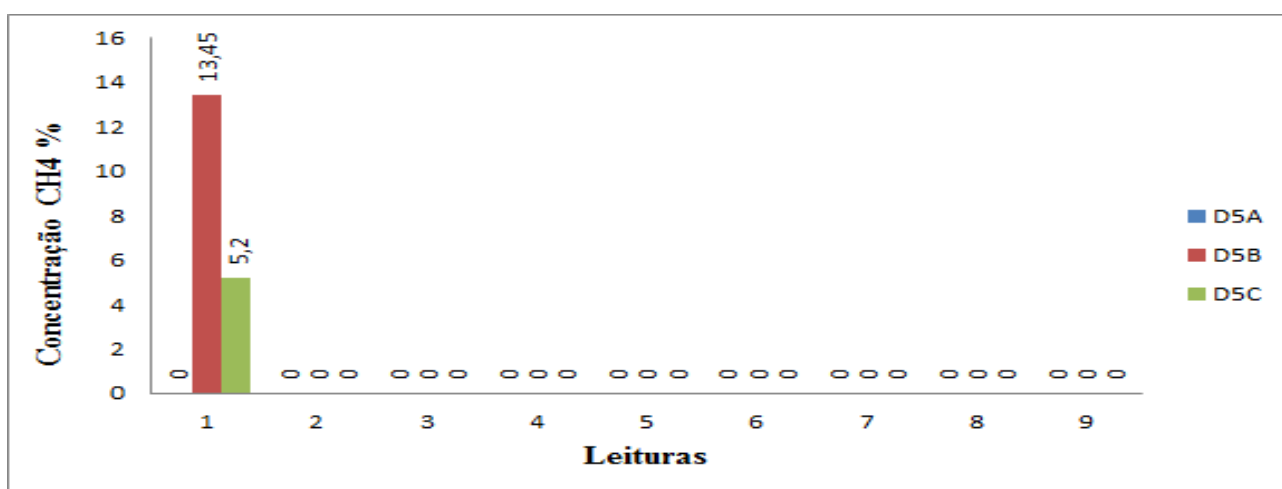


Figura 21 – Teor de CH_4 do biogás produzido na triplicata D5.

O digestor D5A não apresentou teor de CH₄ em nenhuma das leituras realizadas durante o experimento. Os digestores D5B e D5C apresentaram na 1ª leitura concentrações de CH₄ iguais a 13,45% e 5,20%, respectivamente; e teor nulo nas demais medições.

A Figura 22 apresenta o teor de CH₄ no biogás produzido nos digestores da triplicata D6.

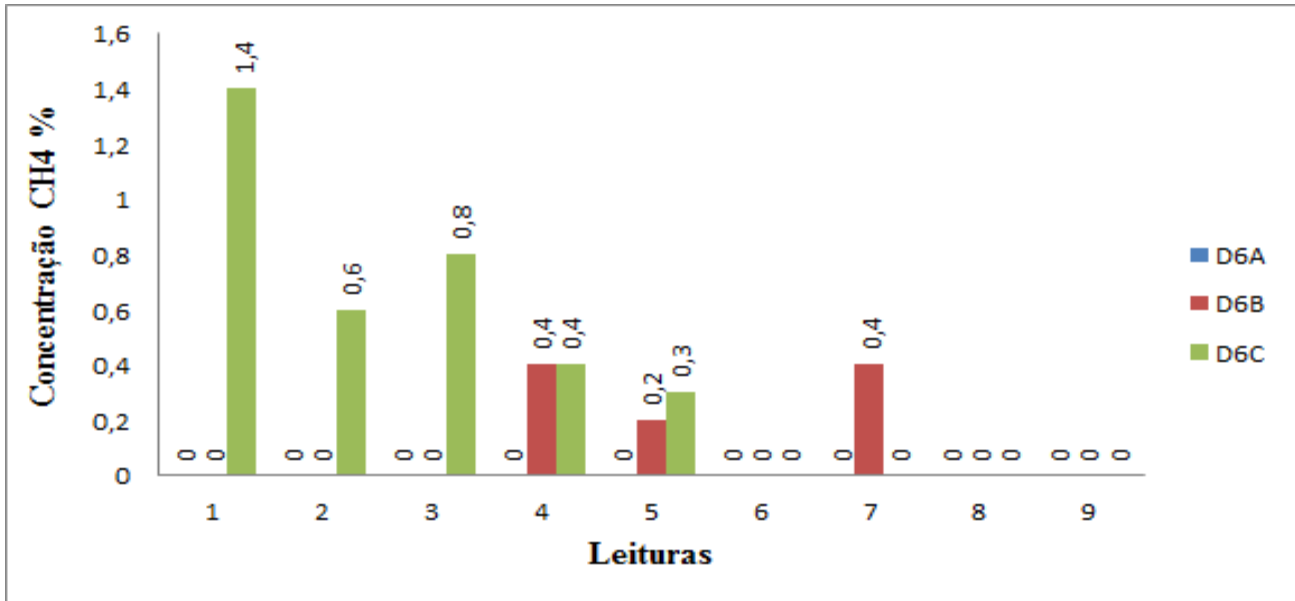


Figura 22 – Teor de CH₄ do biogás produzido na triplicata D6.

O digestor D6A não apresentou teor de CH₄ em nenhuma leitura. O digestor D6B apresentou teores somente na 4ª, 5ª e 7ª leituras. Ocorreram leituras da concentração de CH₄ para o biogás produzido no digestor D6C na 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª medições.

Inoue (2008) utilizou como substrato para os digestores, água residuária de fecularia de mandioca alcalinizada com hidróxido de sódio (NaOH), a 40% (400g L⁻¹) até alcançar valores de pH variando de 5,9 a 6,1.

Silva et al. (2013) avaliaram a digestão anaeróbica com substrato formado pela combinação de esterco ovino e caprino, manipueira e a adição de 25% de biofertilizante proveniente do mesmo substrato e observaram que, com o acréscimo de 25% de biofertilizante no substrato, reduziu-se a quantidade de solução alcalina usada na correção do pH, alcançando valores de pH médio entre 7,0 e 7,85.

Silva et al. (2014) analisaram de forma qualitativa e quantitativa a digestão de manipueira e lodo granulado de ETE (estação de tratamento de esgoto) ajustando o pH na faixa de 7 - 8 nos digestores A2, B2 e C2, usando solução de NaOH de 6 mol L⁻¹. Observou-se que a produção de metano foi maior nos digestores das duplicatas (A2, B2 e C2), o que pode ser explicado pelos ajustes de pH realizados no substrato contido nos mesmos.

Glanpracha e Annachatre (2016), avaliaram a eficácia da codigestão anaeróbica da polpa de mandioca contendo cianeto com dejetos suínos variando a taxa de carregamento orgânico investigaram

o efeito do cianeto presente na polpa de mandioca na codigestão com dejetos suíno sob várias taxas de carregamento o cianeto presente na polpa da mandioca foi degradado com sucesso, indicando que o lodo anaeróbico no digestor foi bem aclimatado ao cianeto.

Silva (2001), relatou que a concentração máxima de sólidos totais para se obter a produção máxima de biogás deve ser inferior a 8%, faixa que possibilita um melhor deslocamento do material no biodigestor, assim evitando possíveis danos como entupimentos nos canos de entrada e saída do reator. Em casos com concentrações maiores que 10%, além de ocorrer a diminuição da eficiência do biodigestor, aumenta-se a probabilidade de criação de crosta.

Diante dos trabalhos citados, pode-se aferir que a correção do pH e temperatura são fatores importantes a serem observados na codigestão da manipueira com vista a produção de biogás,

O uso de biofertilizantes é uma prática que vêm se difundindo na agricultura, porém, ainda é pouco estudada sendo sua utilização de modo empírico. Mediante a esta necessidade faz-se necessário determinar o tempo ideal de fermentação, maximizando a sua produção, qualidade e eficiência de uso (Santos et al. 2016).

Hanauer et al. (2019) observaram que o biofertilizante produzido a partir da digestão anaeróbica de efluente de processamento de mandioca por ter elevada carga orgânica pode ser utilizado para a fertilização de solos. Neste estudo ocorreu uma diminuição da condutividade elétrica com a aplicação de doses crescentes de manipueira no solo, variando de 59,58 a 50,52 $\mu\text{S cm}^{-1}$ no solo com ausência de manipueira e no solo que recebeu a dose igual a 160 kg ha⁻¹.

A possibilidade de uso do digestato como biofertilizante representaria o fechamento do ciclo na cadeia produtiva da mandioca, implicando na sustentabilidade da atividade.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As triplicatas que continham manipueira (D3, D4, D5 e D6) apresentaram baixa produção de biogás com baixo teor de metano, o que pode estar relacionado ao não controle de fatores pH e temperatura.

Entretanto essas triplicatas apresentaram considerável redução de parâmetros como—sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis, DBO e DQO indicando que o processo de digestão anaeróbica pode ser empregado para diminuição da carga orgânica da manipueira.

Novos estudos e experimentos devem ser realizados com o controle e monitoramento de parâmetros fundamentais da digestão anaeróbica, como pH e temperatura, visando otimizar e maximizar a produção e aumentar o teor de metano no biogás.

Devem ser realizados também estudos acerca da viabilidade do uso do digestato oriundo da fermentação anaeróbica da manipueira para fins de fertilização do solo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas técnicas), NBR 10664, 1989.

ABNT (Associação Brasileira de Normas técnicas), NBR 7353, 2019.

AGDAG, O.N.; SPONSA, D.T. Co-digestão de lodo industrial com resíduos sólidos municipais em reatores anaeróbicos de aterros simulados. **Revista bioquímica de Processos**, v. 40, n. 5, p. 1871-1879, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.06.057>.

ANDRADE, W.R.; SANTOS, T. M. B. dos; TREVISAN, P. S. F.; XAVIER, C. de A. N.; CARVALHO K. C. N.; NUNES C. L. de C. Co-digestão Anaeróbia de Dejetos de Ruminantes e Manipueira com uso de dois Corretivos de PH. *In: III SYMPOSIUM ON AGRICULTURAL AND AGROINDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT*, São Pedro-SP, 2013.

APHA. **American Public Health Association**. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20^o. ed. Washington. D.C.: APHA s.n.p. 1998.

BRASIL, (2011). Conselho Nacional do Meio Ambiente. 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.

CONTINI, E.; GASQUES, J.G.; ALVES, E.; BASTOS, E.T.. *et al.* Dinamismo da agricultura brasileira. **Política Agrícola**, Brasília, v. 19, n. edição especial, p. 42-64, Julho 2010.

COSTA, M.S.S.de M.; JUNIOR, J. de L.; COSTA, L. A. de M.; ORRICO, A. C. A. A highly concentrated diet increases biogas production and the agronomic value of young bull's manure.. **Waste Management**, v. 48, p. 521-527, 2016. doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.038.

CREMONEZ, P.A.; ROSSI, E. DE; FEROLDI, M.; TELEKEN, J.G.; FEIDEN, A.; DIETER, J., 2009. Codigestão de água residual de suinocultura e vinhaça sob diferentes condições térmicas, **Revista de Ciências Agrárias**, vol.38, pp.103-110.

CREMONEZ, P.A.; FEIDEN, A.; ZENATTI, D. C.; CAMARGO M. P. de; NADALETI, W. C.; ROSSI, E de; ANTONELLI, J. Biodigestão Anaeróbia no Tratamento de Resíduos Lignocelulósicos. **Revista Brasileira de Energia Renováveis**, v. 2, p. 21-35, 2013.

DAMIANOVIC, M. H., FORESTI, E., (1992). Estudo do efeito de nutrientes no desempenho de reatores de manta de lodo em escala de bancada alimentados com efluentes do processamento de milho.

DIAS, Larissa T.; LEONEL, Magali. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE FARINHAS DE MANDIOCA DE DIFERENTES LOCALIDADES DO BRASIL. **ciência e tecnologia**, lavras, v. 30, n. 4, p. 692-700, julho/agosto 2006. doi.org/10.1590/S1413-70542006000400015.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. 2012. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias>. Acesso em: 10 Abr. 2020.

FERNANDES, ÁLVARO J. **Variáveis microbiológicas e físico-químicas em biodigestores anaeróbios escala piloto alimentados com dejetos de bovinos leiteiros e suínos..** Juiz de Fora, 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados) - Universidade Federal de Juiz de Fora.

GLANPRACHA, N.; ANNACHHATRE, A.P.- Anaerobic co-digestion of cyanide containing cassava pulp with pig manure. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 112-121, 2016. doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.079.

HANAUER, T. V. ; ANDERLE, G. A. ; HERMES, E. Influência do Uso de Efluente de Processamento de Mandioca Proveniente de Biodigestor nas Características de Solo Cultivados com Soja. **Revista brasileira de Energia Renováveis**, Paraná, v. 8, n. 2, p. 468-479, 2019.

HASAN, C. **Análise da sinergia de resíduos agroindustriais submetidos à biodigestão anaeróbia visando geração de biogás para aproveitamento energético**. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2016.

IBGE (2017), censo 2010. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 3 Abr. 2020.

IBGE (2018). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. <https://sidra.ibge.gov.br/territorio>. Disponível em: . Acesso em: 7 Abr. 2020.

INOUE, K.R.A.. **Produção de biogás, caracterização e aproveitamento agrícola do biofertilizante obtido na digestão da manipueira**. Dissertação Mestrado UFV, p. 1-92, 2008. locus.ufv.br/handle/123456789/3508.

ITODO, I. N.; AWULU, J. O. 1999. Effects of total solids concentrations of poultry, cattle, and piggery waste slurries on biogas yield, Transactions of the ASAE, vol. 42, pp. 1853- 1855.

JINGURA, R.M.; MATENGAIFA, R. Otimização da produção de biogás por digestão anaeróbica para desenvolvimento sustentável de energia no Zimbábue. **Revista revisões sobre energia renovável e sustentável**, v. 13, n. 5, p. 1116-1120, 2009. doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.015.

MARION, J. C.; SEGATTI, S.; **Contabilidade Rural: Contabilidade Agrícola, Contabilidade da Pecuária Imposto de Renda-Pessoa Jurídica**. São Paulo: Atlas S.A., 2012, p. 1-132.

MATA-ALVAREZ, J., MACE, S., LLABRES, P., (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16.

MIRANDA, R.M.B.; FERRO, M. M. M.; GONZAGA, G. B. M.; VARGAS, K. S. C. G.; CEZAR, V. R. S. **Avaliação do tratamento anaeróbio de substratos oriundos da mistura de esterco bovino e manipueira**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE E NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4. 2009. Anais eletrônicos... Belém, 2009.

ORRICO, A.C.A.; ORRICO JUNIOR, M.A.P.; LUCAS JUNIOR, J DE., 2010. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica, **Revista Engenharia Agrícola**, vol.29, pp. 474-482.

PINTO, Paulo H. M. **Tratamento de manipueira de feccularia em biodigestor anaeróbio para disposição em corpo receptor, rede pública ou uso em fertirrigação**. Botucatu, 2008. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista.

PRAZERES, A. R., CARVALHO, F., RIVAS, J., (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48-68.

QUEIROZ , Camila K. de; PAES, J. L.; FERNANDES, P L. B. G. **Caracterização da Produção de Biogás a Partir da Biodigestão de Lodo de Esgoto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2018, Gramado, 2018.

RIO GRANDE DO SUL. CONSEMA. Resolução n. 355, de 13 de julho de 2017. **Diário Oficial.** Porto Alegre, 19 de julho de 2017.

SILVA, I. P. M.; **Sistema de Agitação Para Digestores Anaeróbios.** Portugal, p. 1-50. Dissertação (Mestrado em engenharia e gestão industrial) - Universidade de Aveiro, 2009.

SILVA, C. de O.; CEZAR, V. R. S.; SANTOS, M. B.; SANTOS, A. S. Biodigestão anaeróbia com substrato formado pela combinação de esterco ovino caprino, manipueira e biofertilizante. **Revista Ibero- Americana de Ciências Ambientais**, v. 4, n. 1, p. 88-103, 2013. doi.org/10.6008/ESS2179-6858.2013.001.0007.

SILVA, I.J.S.; SILVA, G. A.; CABRAL, K. V. G.; MONTEIRO, M. R. S.; SILVA, P. C.; PERES, S.; PALHA, A.P.F. Produção de metano a partir de manipueira e lodo de ETE. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2014.

SUZUKI, A.B.P.; FEIDEN, A.; FERNANDES D. M.; MARTINS, G.I.; FARIA, R. A. P. Utilização de manipueira juntamente com sólidos da cama de aviário em biodigestores para geração de biogás. **Revista Ambiência**, v. 8, n. 3, p. 809-820, 2012. doi:10.5777/ambiência.2012.05.01.

ARTIGO CIENTÍFICO 3

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA E DE BIOFERTILIZANTE A PARTIR DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DA MANDIOCA E DE DEJETO BOVINO NO MUNICÍPIO DE SÃO FRANCISCO DE ITABAPOANA

POTENTIAL FOR POWER GENERATION AND BIOFERTILIZER FROM RESIDUES FROM CASSAVA AND BOVINE MANURE PROCESSING IN THE MUNICIPALITY OF SÃO FRANCISCO DE ITABAPOANA

Everaldo Vieira Pinto - IFFluminense/PPEA

Adriano Henrique Ferrarez - IFFluminense/PPEA

Marcos Antônio Cruz Moreira – IFFluminense/PPEA

RESUMO

O município de São Francisco de Itabapoana é o maior produtor de mandioca do estado do Rio de Janeiro. Outra atividade importante é a bovinocultura. Há geração de resíduos com grande potencial poluidor (manipueira e dejetos bovinos) em ambas atividades, sendo a digestão anaeróbica uma alternativa para de tratamento. O objetivo deste trabalho foi estimar o potencial de produção de biometano e biofertilizante no município. A estimativa foi realizada a partir de dados da produção agrícola e pecuária do município para diferentes cenários. O potencial máximo de biometano foi de $8,82 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$. A produção de biofertilizante pode chegar a aproximadamente 1.800 t ano^{-1} . O potencial de energia elétrica gerada foi de até $29.887 \text{ MWh ano}^{-1}$. O número máximo de tanques de veículos abastecidos anualmente foi: (i) Caminhões: 33.669; Ônibus: 44.007. O uso do biometano pode representar a redução de até $12.373 \text{ tCO}_{2\text{eq}} \text{ ano}^{-1}$. O tratamento da manipueira e dejetos bovinos pode impactar positivamente os aspectos ambientais, sociais e econômicos do município colaborando para o seu desenvolvimento sustentável.

Palavras chaves: Manipueira. Dejeto Bovino. Biogás. Biofertilizante

ABSTRACT

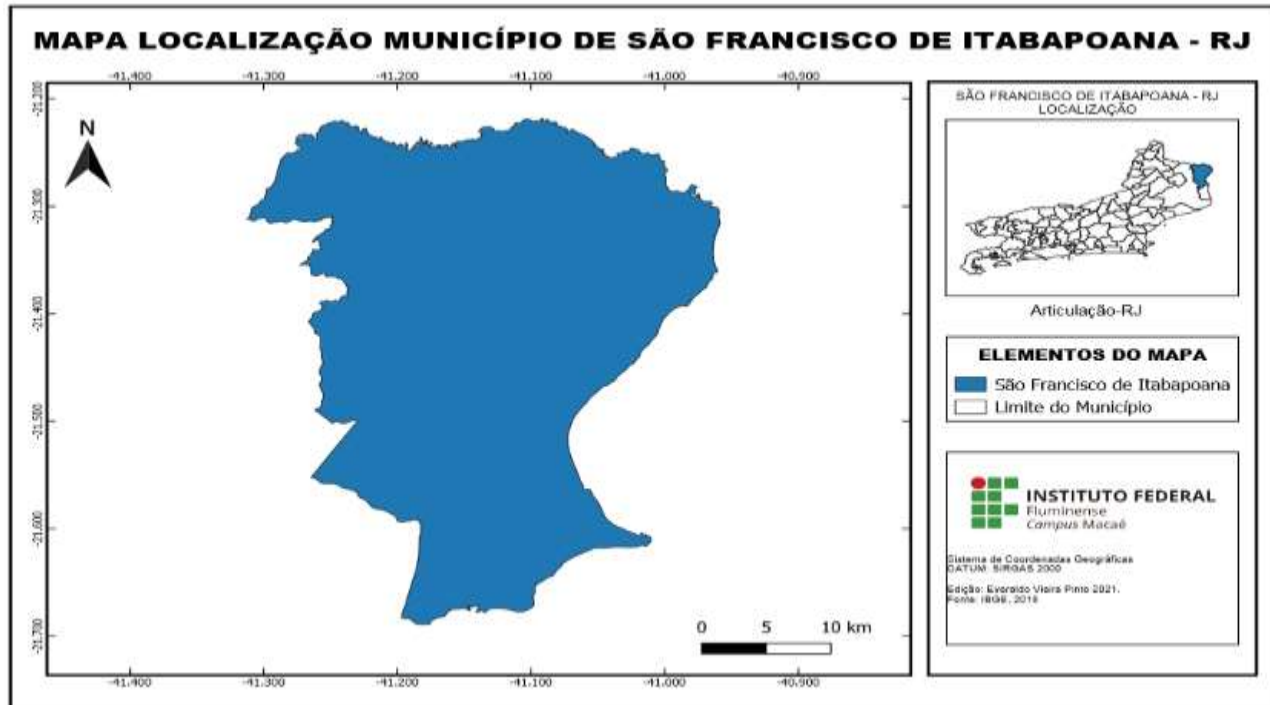
The municipality of São Francisco de Itabapoana is the largest cassava producer in the state of Rio de Janeiro. Another important activity is cattle raising. There is the generation of waste with great polluting potential (manipueira and bovine manure) in both activities, with anaerobic digestion being an alternative for treatment. The objective of this work was to estimate the production potential of biomethane and biofertilizer in the municipality. The estimate was based on data from the municipality's agricultural and livestock production for different scenarios. The maximum potential of biomethane was $8.82 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$. Biofertilizer production can reach approximately $1,800 \text{ t year}^{-1}$. The potential for electricity generated was up to $29,887 \text{ MWh}$ annually. The maximum number of fueled vehicle tanks in one year is: (i) Trucks: 33,669; (ii) Bus: 44,007. The use of biomethane can represent a reduction of up to $12,373 \text{ tCO}_2\text{eq year}^{-1}$. The treatment of manipueira and bovine manure can positively impact the municipality's environmental, social and economic aspects, contributing to its sustainable development.

Keywords: Manipueira, Bovine Manure. Biogas, Biofertilizer

1. INTRODUÇÃO

O município de São Francisco de Itabapoana, localizado no norte do estado do Rio de Janeiro possui uma população de 41.354 habitantes com densidade demográfica de 36,84 hab/km². O Produto Interno Bruto (PIB) per capita é de R\$ 32.220,35 e renda média mensal de 1,8 salários mínimos. O município apresenta 13% dos domicílios com esgotamento sanitário adequado e 34,7% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada. Em relação aos índices educacionais tem-se: (i) taxa de escolaridade das séries iniciais e ensino fundamental de 98% e IDEB (Índice de Desenvolvimento da Educação Básica) nos anos iniciais do ensino fundamental (rede pública) de 4,6 e nos anos finais de 3,5. No estado do Rio de Janeiro este índice nas séries iniciais é de 5,4 e nas séries finais é de 4,4 do ensino fundamental. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de São Francisco de Itabapoana é de 0,639 ocupando a penúltima posição entre os 92 municípios do estado do Rio de Janeiro e a 3312^a entre os 5.565 municípios brasileiros (IBGE,2019a). Uma das alternativas para o tratamento dos resíduos da produção de mandioca e da criação de bovinos é a digestão anaeróbica que consiste na degradação de material orgânico por meio da ação de microrganismos

A Figura 1 mostra o mapa do município de São Francisco de Itabapoana.



Elaboração: (Autor, 2021)

Figura 1 – Mapa do município de São Francisco de Itabapoana

O município possui significativo patrimônio natural e cultural. Preserva sua arquitetura colonial, grandes latifúndios com seus casarões, sua tradicional produção artesanal nas fabriquetas de farinha de mandioca, suas danças de origem africana, portuguesa e indígena. No município possui sítios de importância arqueológica com fortes indícios de serem cemitérios escravos. Em relação ao patrimônio natural, o município é banhado por cerca de 60 km de belas praias com temperaturas quase sempre amenas e águas tranquilas. Sua zona costeira possui um vasto ecossistema rico em biodiversidade, destacando-se seus diversos manguezais. O município também é beneficiado por sua formação geológica composta por rochas que vão do Pré-Cambriano até o Quaternário (MORAES et al., 2012).

1.1 CULTIVO DE MANDIOCA

A mandioca é considerada o terceiro mais importante cultivo da região tropical depois do arroz e do milho. Boa fonte de carboidratos, produzida em mais de 90 países, a mandioca pode ser produzida em condições de solos ricos e pobres em nutrientes diferentemente de outras culturas. Com o crescimento da produção de 2,6% no período de 2011 a 2018 o processamento de mandioca a nível mundial atingiu um volume de 253,4 milhões de toneladas em 2018. A atividade representa o alimento e renda da população em países da África, América Latina e Ásia. Grande parte da mandioca produzida é consumida in natura e o restante é processado como amido, farinha, pellets, chips, etc. O processamento da mandioca agrega valor ao produto final, aumenta a validade do produto e remove as toxinas presentes (ácido cianídrico HCN). Desta forma o processamento de mandioca fornece vários produtos como alimentos, etanol, papel e papelão, têxteis, produtos farmacêuticos, colas e adesivos (RESEARCH AND MARKETS, 2019).

A mandioca tem sua origem na América do Sul. O Brasil é o quarto maior produtor de mandioca do mundo, sendo um produto de elevadíssima importância socioeconômica, tanto na alimentação humana como animal. Devido a sua adaptabilidade, é uma planta bastante cultivada em áreas onde outras espécies amiláceas não se desenvolvem com a mesma desenvoltura. A mandioca pode ser utilizada diretamente para o consumo ou destinada para a indústria na fabricação de farinha ou fécula (PASTORE, 2010).

Maior produtor de mandioca do estado do Rio de Janeiro, o município de São Francisco de Itabapoana registrou no ano de 1976 uma área plantada de 36.000 ha e 150 fábricas de farinha. Fato totalmente diferente do registrado em 2018 onde a área plantada foi de 3.250 ha (IBGE, 2020), e as fábricas de processamento foram reduzidas para 30 de porte médio e 16 artesanais (mão de obra familiar). As fábricas de porte médio produzem em média 2.500 kg de farinha a partir do

processamento de 10 t de mandioca. A redução do número de fábricas de farinha se deveu à concorrência com a farinha produzida no estado do Paraná. Além disso, as fábricas de São Francisco de Itabapoana apresentavam grande defasagem tecnológica. Com o Projeto Cadeia Produtiva da Mandioca vinculado ao programa Rio Rural e ao escritório local da EMATER (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural), 17 fábricas estão se adequando à legislação trabalhista, ambiental e sanitária. Oito fábricas receberam recursos do Programa Rio Rural e criaram uma associação. As demais fábricas estão se adequando com recursos próprios (EMATER/RIO, 2019).

1.2 BOVINOCULTURA

O Brasil tem na bovinocultura (corte e leite) uma de suas principais atividades agropecuárias com um rebanho composto por 213,5 milhões de cabeças de gado (IBGE, 2018). A criação de bovinos no Brasil ocorre em dois tipos de sistemas: (i) extensivo: se caracteriza pela baixa lotação (números de animais em uma determinada área), sem planejamento apropriado e disponibilidade de forragens, onde o manejo zootécnico é ausente ou pouco presente; e (ii) intensivo: se caracteriza por pastagens adubadas, artificiais, irrigadas, com forrageiras adequadas à região, propiciando a divisão dos pastos para o estabelecimento do rodízio. O estado do Rio de Janeiro possui rebanho de 2,5 milhões de cabeças de gado, sendo o rebanho do município fluminense de São Francisco de Itabapoana estimado em 76,5 mil cabeças de gado (IBGE, 2018).

O rebanho bovino do município de São Francisco de Itabapoana produz leite e carne respondendo por aproximadamente a 3% da produção estadual desses dois produtos (EMATER/RIO, 2017).

1.3. RESÍDUOS

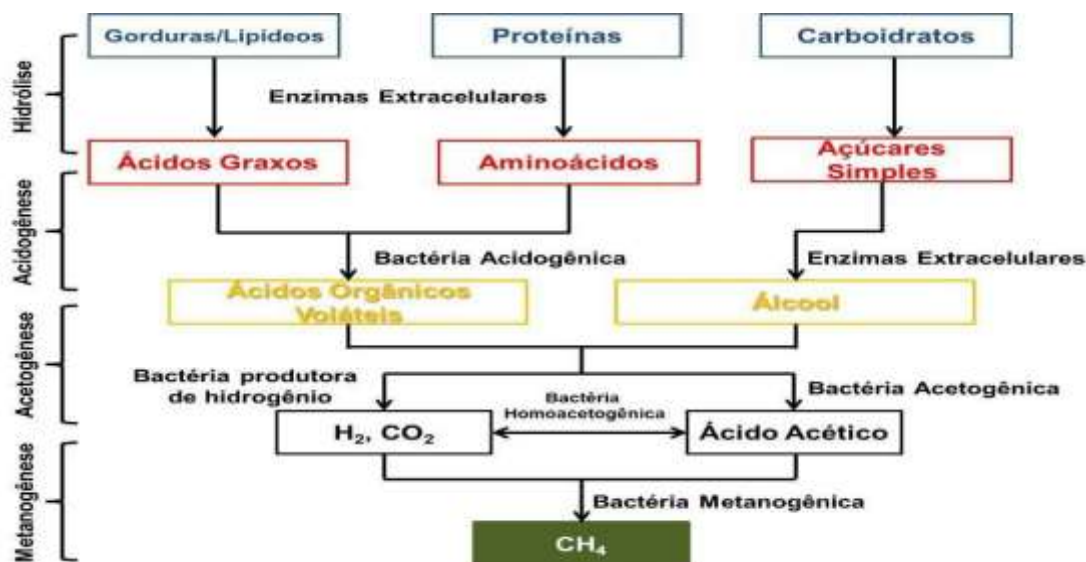
O processamento da mandioca produz a manipueira que é um resíduo danoso ao meio ambiente uma vez que para cada tonelada de mandioca processada somente na fase de fabricação de farinha e amido são gerados aproximadamente 300 litros de manipueira. Este efluente tem potencial poluidor cerca de 25 vezes maior que o esgoto doméstico. Quando lançado diretamente em corpos de água provoca a alteração da capacidade de autodepuração e a eutrofização. Dependendo do tipo de processamento utilizado durante o beneficiamento da mandioca, a manipueira, pode apresentar diferentes concentrações de ácido cianídrico (HCN) e compostos tóxicos como a linamarina, que pode se combinar com a hemoglobina do sangue e bloquear o sistema respiratório de humanos e animais (SANTOS, 2009).

Os resíduos gerados na criação de bovinos variam com a espécie animal, alimentação e manejo dos resíduos. Bovinos de leite, por receberem volumes elevados em quantidade de alimentos, produzem maior quantidade de fezes que os de corte, estando essa produção na faixa de 7-8% de sua massa corporal. Considerando uma base de 450 kg de peso vivo o que corresponde uma unidade animal, as criações produzem anualmente uma média de 8,5 toneladas de dejetos para bovinos de corte, e 12 toneladas de dejetos para bovinos de leite (MATOS, 2014).

1.4. DIGESTÃO ANAERÓBICA

Uma das alternativas para o tratamento dos resíduos da produção de mandioca e da criação de bovinos é a digestão anaeróbica que consiste na degradação de material orgânico por meio da ação de microrganismos (COSTA et al., 2016).

A Figura 2 a seguir mostra o processo de digestão anaeróbica e suas fases.



Fonte: (FERRAREZ et al., 2020)

Figura 2 – Fases da digestão anaeróbica

A codigestão anaeróbica trata-se de diferentes resíduos aptos a fermentação, misturados, para serem processados e tratados simultaneamente (AGDAG e SPONSA, 2007). De acordo com Jingura e Matengaifa (2009), este tipo de tratamento visa melhorar o desempenho do processo, pois teoricamente, aprimora a taxa de produção do biogás e enriquece a qualidade do biofertilizante derivado do processo. O processo de degradação da matéria orgânica realizado por microrganismos anaeróbicos resulta em dois subprodutos: biogás e biofertilizantes (ONUDI, 2016).

A implantação de biodigestores é uma alternativa vantajosa no que diz respeito ao aproveitamento de efluentes orgânicos, pois além de reduzir a poluição ambiental permite à agroindústria economia de energia e insumos (PAULINO et al, 2014).

O biogás é uma mistura gasosa combustível composta principalmente de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), derivada da atividade biológica durante a decomposição de resíduos orgânicos em meio anaeróbio (sem a presença de oxigênio). O termo biometano é utilizado para identificar a mistura gasosa resultante do processo de limpeza, purificação ou *upgrading* do biogás, no qual são retirados, principalmente, umidade, CO_2 , H_2S , siloxanos (no biogás de aterro e ETE) e outros contaminantes a nível de traços. As vantagens do biometano sobre o biogás é que ele possui características físico-químicas semelhantes às do gás natural, fato que o credencia a substituir este combustível em seus diversos usos, com a vantagem de ser produzido a partir de matéria orgânica residual e renovável (SUANI et al., 2018).

O biofertilizante é um produto com grande valor econômico e agrônômico obtido da codigestão anaeróbica. Entretanto só encontra valor de mercado se estiver livre de contaminantes. O aproveitamento do biofertilizante produzido a partir dos resíduos agropecuários implica na redução do uso de combustíveis fósseis como o gás natural e o carvão mineral para a produção de fertilizantes.

O uso de biofertilizantes é uma prática que vêm se difundido na agricultura, ainda é pouco estudada remetendo ao uso de modo empírico baseado na experiência e observação. Mediante a isso faz-se necessário determinar o tempo ideal de fermentação, maximizando a sua produção, qualidade e eficiência de uso (SANTOS et al., 2016).

Hanauer et al. (2019) observaram que o biofertilizante produzido a partir da digestão anaeróbica de efluente de processamento de mandioca por ter elevada carga orgânica pode ser utilizado para a fertilização de solos. A possibilidade de uso do digestato como biofertilizante representaria o fechamento do ciclo na cadeia produtiva da mandioca, implicando na sustentabilidade da atividade. O biofertilizante contém nutrientes essenciais para a planta, sendo o nitrogênio amoniacal o mais abundante. Possui ainda quantidades consideráveis de potássio, cálcio, fósforo e magnésio. (ERTHAL et al., 2010a).

O objetivo deste trabalho foi estimar o potencial de produção de biogás a partir da manipueira e de dejetos bovinos no município de São Francisco de Itabapoana, estado do Rio de Janeiro, e o impacto de seus equivalentes energéticos na matriz energética do município. Foi estimado também o potencial de produção de biofertilizante a partir do digestato obtido da codigestão anaeróbica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. FERRAMENTA COMPUTACIONAL SAUDADE

A ferramenta computacional SAUDADE (Sistema de Avaliação do Uso da Digestão Anaeróbica para o Dimensionamento Energético) é formada por planilhas de cálculo do Microsoft Excel.

A Figura 3 mostra um fluxograma da ferramenta computacional desenvolvida.

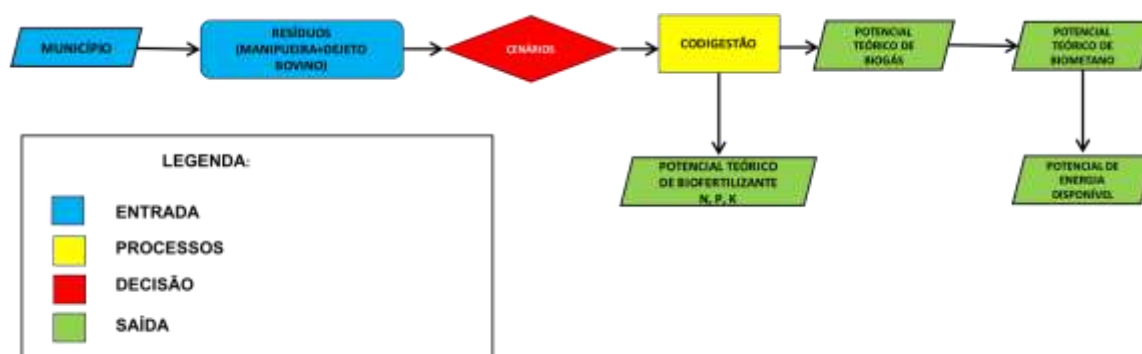


Figura 3 – Fluxograma da Ferramenta Computacional SAUDADE.

2.2. FONTE DE DADOS:

Primeiramente selecionou-se o município para o qual será realizado o planejamento energético do uso dos resíduos agropecuários, no caso São Francisco de Itabapoana/RJ.

Os dados da produção de resíduos agropecuários (manipueira e dejetos bovinos) foram obtidos a partir da Pesquisa Agrícola Municipal (IBGE, 2020a) e da Pesquisa Pecuária Municipal (IBGE, 2020b).

O objetivo principal da ferramenta é estimar como o aproveitamento dos resíduos agropecuários podem mitigar os impactos dos mesmos no meio ambiente. A opção de tratamento dos resíduos é por meio da codigestão anaeróbica com a produção de biogás/biometano a ser utilizado na geração de energia e de biofertilizante a ser utilizado no cultivo de mandioca.

2.2.1 CENÁRIOS

O Quadro 1 apresenta os cenários para estimativa da produção de biogás/biometano a partir da codigestão de manipueira e dejetos bovinos no município de São Francisco de Itabapoana/RJ considerando os percentuais de resíduos (manipueira e dejetos bovinos) utilizados.

Quadro 1 – Cenários para estimativa da produção de biogás/biometano a partir da codigestão de manipueira e dejetos bovinos.

Cenários	% de mandioca destinada às Casas de		% de resíduos	
	Farinha	Manipueira	Dejeto Bovino	
1		0	100	
2		100	0	
3	30%	75	25	
4		50	50	
5		25	75	
6		100	100	
7		0	100	
8		100	0	
9	50%	75	25	
10		50	50	
11		25	75	
12		100	100	
13		0	100	
14		100	0	
15	70%	75	25	
16		50	50	
17		25	75	
18		100	100	

Elaboração (Autor, 2021)

2.2.2 PRODUÇÃO DE MANIPUEIRA

O volume de manipueira disponível foi calculado, de acordo com a equação 1, considerando-se os percentuais de 30%, 50% e 70% de mandioca destinada para as casas de farinha no município de São Francisco de Itabapoana/RJ.

$$V_{mani} = 0,33 \times M_{mandioca} \times \%CF \quad (1)$$

em que:

V_{mani}	-	Volume de manipueira,	$m^3 \text{ ano}^{-1}$;
0,33	-	Volume de manipueira por massa de mandioca processada,	$m^3 \text{ t}^{-1}$
$M_{mandioca}$	-	Produção de mandioca,	$t \text{ ano}^{-1}$; e
% CF	-	Percentual de mandioca para casas de farinha,	adimensional.

O volume de manipueira por massa de mandioca é de $0,33 \text{ m}^3$ por tonelada foi considerado de FIORETTO, et al. (2001).

2.2.3 PRODUÇÃO DE DEJETO BOVINO

A massa de dejetos bovino produzida no município de São Francisco de Itabapoana/RJ foi calculada considerando o rebanho efetivo por meio da equação 2.

$$M_{bov} = 365 \times N_{bov} \times d_{ej} \times 0,6 \quad (2)$$

em que:

M_{bov}	-	Produção anual de dejetos bovino,	$kg \text{ ano}^{-1}$;
365	-	Dias do ano,	dia
N_{bov}	-	Rebanho efetivo por ano,	animais ano^{-1} ;
D_{ej}	-	Produção de dejetos por animal,	$kg (\text{animal dia})^{-1}$; e
0,6	-	Taxa de recuperação do dejetos,	adimensional.

A massa diária de dejetos bovino produzida por animal foi considerada de SOUZA (2011).

2.2.4 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O Quadro 2 apresenta o potencial de produção de biogás para o dejetos bovino e a manipueira. Esses valores foram retirados da literatura.

Quadro 2 – Potencial de biogás dos resíduos agropecuários

Resíduo	Produção de biogás	Referência
Manipueira	4,1 m ³ /m ³ de manipueira	(FEIDEN e CEREDA, 2003)
Bovino	0,025 m ³ /kg de dejetos	(AMARAL et al., 2004)

Elaboração (Autor, 2021)

2.2.5 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA MANIPUEIRA

A equação 3 fornece a produção de biogás a partir da manipueira.

$$P_{biogás\ mani} = V_{mani} \times biogás_{mani} \quad (3)$$

em que:

$P_{biogás\ mani}$ - Produção de biogás da manipueira, m³ ano⁻¹;

V_{mani} - Volume de manipueira, m³ ano⁻¹;

$biogás_{mani}$ - Volume de biogás produzido a partir da manipueira, m³ (m³ de manipueira)⁻¹.

2.2.6 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO DEJETO BOVINO

A equação 4 fornece a produção de biogás a partir do dejetos bovino.

$$P_{biogás\ bov} = M_{bov} \times biogás_{bov} \quad (4)$$

em que:

$P_{\text{biogás bov}}$	- Produção de biogás de dejetos bovino,	$\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$;
M_{bov}	- Produção anual de dejetos animais,	kg ano^{-1} ;
$\text{biogás}_{\text{bov}}$	- Volume de biogás a partir do dejetos bovino	$\text{m}^3 (\text{kg})^{-1}$.

2.2.7 PRODUÇÃO DE BIOMETANO

A produção de biometano foi calculada de acordo com a equação 5 a seguir.

$$P_{\text{biometano}} = P_{\text{biogás}} \times 0,6 \quad (5)$$

em que:

$P_{\text{biometano}}$	- Produção de biometano,	$\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$;
$P_{\text{biogás}}$	- Produção anual de biogás,	$\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$;
0,6	- Concentração de metano no biogás,	adimensional.

Considerou-se o percentual de 60% de metano no biogás produzido a partir de Galbiatti et al., 2010.

2.2. POTENCIAL DE ENERGIA A PARTIR DO BIOMETANO

O potencial de energia disponível a partir do biometano foi calculado a partir da equação 6.

$$E = P_{\text{biometano}} \times PCI_{\text{biometano}} \times 10^{-9} \quad (6)$$

em que:

E	- Potencial de energia,	TJ ano^{-1} ;
$P_{\text{biometano}}$	- Produção de biometano,	$\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$; e
$PCI_{\text{biometano}}$	- Poder Calorífico Inferior do biometano,	kJ m^{-3} .

Considerou-se o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biometano igual a 36.000 kJ m^{-3} (PANTALEO, et al., 2013).

2.2.9 POTÊNCIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOMETANO

A potência elétrica disponível a partir do metano produzido foi calculada com a equação 7.

$$Pot_{elétrica} = PCI_{biometano} \times \dot{v} \times \eta_{motor-gerador} \quad (7)$$

em que:

$Pot_{elétrica}$	- Potência elétrica,	kW;
$PCI_{biometano}$	- Poder Calorífico Inferior do biometano,	kJ m^{-3} ;
\dot{v}	- vazão de biometano,	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; e
$\eta_{motor-gerador}$	rendimento do conjunto motor-gerador,	adimensional.

A eficiência do conjunto motor gerador foi definida considerando a produção de biometano (PANTALEO, *et al.*, 2013).

2.2.10 ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA

O cálculo da energia elétrica produzida a partir do metano obtido dos resíduos foi dado pela equação 8.

$$EE = Pot_{elétrica} \times \Delta t \times 10^{-3} \quad (8)$$

em que:

EE	- Energia elétrica gerada com biometano,	MWh ano^{-1} ;
$Pot_{elétrica}$	- Potência elétrica da usina,	kW; e
Δt	- Tempo de operação da usina,	h/ano^{-1} .

2.2.11 POTENCIAL DE ABASTECIMENTO DE VEÍCULOS

O potencial anual para abastecimento de frota com o biometano considerou os seguintes tipos de veículos: (i) ônibus; e (iii) caminhão.

2.2.11.1 ÔNIBUS

O número possível de tanques de ônibus a serem abastecidos anualmente com o biometano oriundo da codigestão anaeróbica da manipueira e dejetos bovinos foi calculado a partir da equação 9.

$$n_{\text{ônibus}} = \frac{P_{\text{biometano}}}{V_{\text{ônibus}}} \quad (9)$$

em que:

- $n_{\text{ônibus}}$ - Tanques de combustível de ônibus abastecidos, adimensional;
- $P_{\text{biometano}}$ - Produção de biometano, $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$; e
- $V_{\text{ônibus}}$ - Volume do tanque de combustível de ônibus, m^3 .

A capacidade do tanque de combustível do ônibus para biometano considerada foi de 180 m^3 (ZEG, 2020).

2.2.11.2 CAMINHÕES

O número possível de tanques de caminhões a serem abastecidos anualmente com o biometano oriundo da codigestão anaeróbica da manipueira e dejetos bovinos foi calculado a partir da equação 10.

$$n_{\text{caminhão}} = \frac{P_{\text{biometano}}}{V_{\text{caminhão}}} \quad (10)$$

em que:

- $n_{\text{ônibus}}$ - Tanques de combustível de caminhão abastecidos, adimensional;
- $P_{\text{biometano}}$ - Produção de biometano, $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$; e
- $V_{\text{ônibus}}$ - Volume do tanque de combustível de caminhão, m^3 .

A capacidade do tanque de combustível do caminhão para biometano considerada foi de 263 m³ (ZEG, 2020).

2.2.12 POTENCIAL DE BIOFERTILIZANTE OBTIDO A PARTIR DO DIGESTATO

O potencial de biofertilizante obtido a partir do digestato resultante da codigestão anaeróbica foi calculado considerando os valores de macronutrientes contidos nos resíduos de manipueira e dejetos bovinos.

2.2.13 POTENCIAL DE BIOFERTILIZANTE DA MANIPUEIRA

2.2.13.1 NITROGÊNIO CONTIDO NA MANIPUEIRA

A massa de nitrogênio disponível (uréia com 45% de N) foi calculada a partir da equação 11 a seguir:

$$m_{N_{mani}} = V_{mani} \times N_{mani} \times 10^{-3} \quad (11)$$

em que:

- $m_{N_{mani}}$ - Massa total de nitrogênio (uréia 45% de N) na manipueira, ; t ano⁻¹
- V_{mani} - Volume de manipueira, m³ ano⁻¹; e
- N_{mani} - concentração de nitrogênio (uréia 45% de N) na manipueira, kg de ureia/m³ de manipueira.

O volume de manipueira (V_{mani}) foi calculado considerando-se os percentuais de 30%, 50% e 70% de disponibilidade dos resíduos no município de São Francisco de Itabapoana.

2.2.13.2 FÓSFORO CONTIDO NA MANIPUEIRA

A massa de fósforo disponível (superfosfato triplo 45% P₂O₅) foi calculada a partir da equação 12 a seguir:

$$m_{P_{mani}} = V_{mani} \times P_{mani} \times 10^{-3} \quad (12)$$

em que:

- $m_{P_{mani}}$ - Massa total de fósforo (superfosfato triplo (45% de P_2O_5) na manipueira, ; t ano⁻¹
- V_{mani} - Volume de manipueira, m³ ano⁻¹; e
- P_{mani} - concentração de fósforo (superfosfato triplo (45% de P_2O_5) na manipueira, kg de ureia/m³ de manipueira.

O volume de manipueira (V_{mani}) foi calculado considerando-se os percentuais de 30%, 50% e 70% de disponibilidade dos resíduos no município de São Francisco de Itabapoana.

2.2.13.3 POTÁSSIO CONTIDO NA MANIPUEIRA

A massa de potássio disponível (60% de K_2O) foi calculada a partir da equação 13 a seguir:

$$m_{K_{mani}} = V_{mani} \times K_{mani} \times 10^{-3} \quad (13)$$

em que:

- $m_{K_{mani}}$ - Massa total de potássio (60% de potássio) na manipueira, ; t ano⁻¹
- V_{mani} - Volume de manipueira, m³ ano⁻¹; e
- K_{mani} - concentração de potássio (60% de nitrogênio) na manipueira, kg de ureia/m³ de manipueira.

O volume de manipueira (V_{mani}) foi calculado considerando-se os percentuais de 30%, 50% e 70% de disponibilidade dos resíduos no município de São Francisco de Itabapoana.

2.2.14 POTENCIAL DE BIOFERTILIZANTE DO DEJETO BOVINO

2.2.14.1 NITROGÊNIO CONTIDO NO DEJETO BOVINO

A massa de nitrogênio disponível no dejetos bovino foi calculada a partir da equação 14 a seguir:

$$m_{N_{bov}} = M_{bov} \times N_{bov} \times 10^{-3} \quad (14)$$

em que:

- $m_{N_{bov}}$ - Massa total de nitrogênio no dejetos ; t ano⁻¹
bovino,
- M_{bov} - Massa de dejetos bovino, kg ano⁻¹; e
- N_{bov} - concentração de nitrogênio no dejetos kg de N/kg de dejetos bovino.
bovino,

2.2.14.2 FÓSFORO CONTIDO NO DEJETO BOVINO

A massa de fósforo disponível no dejetos bovino foi calculada a partir da equação 15 a seguir:

$$m_{P_{bov}} = M_{bov} \times P_{bov} \times 10^{-3} \quad (15)$$

em que:

- $m_{P_{bov}}$ - Massa total de fósforo no dejetos bovino, ; t ano⁻¹
- M_{bov} - Massa de dejetos bovino, kg ano⁻¹; e
- P_{bov} - concentração de fósforo no dejetos bovino, kg de P/kg de dejetos bovino.

2.2.14.3 POTÁSSIO CONTIDO NO DEJETO BOVINO

A massa de potássio disponível no dejetos bovino foi calculada a partir da equação 16 a seguir:

$$m_{K_{bov}} = M_{bov} \times K_{bov} \times 10^{-3} \quad (16)$$

em que:

- $m_{K_{bov}}$ - Massa total de potássio no dejetos bovino, ; t ano⁻¹

- M_{bov} - Massa de dejetos bovino, kg ano^{-1} ; e
- K_{bov} - concentração de potássio no dejetos bovino, $\text{kg de K/kg de dejetos bovino}$.

2.2.15 REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂

O cálculo das emissões de dióxido de carbono (CO₂) evitadas ou Certificado de Emissões Reduzidas (CER) foi realizado considerando-se a produção de energia elétrica a partir do metano, o fator de emissão de CO₂ (FEC) adotado nos cálculos foi de 0,414 tCO₂eq./MWh (POESCHL *et al.*, 2010). A equação que fornece os Certificados de Emissões Reduzidas (CER's) equivalentes com a geração de eletricidade é dada pela equação 17.

$$C_{ER} = EE \times F_{EC} \quad (17)$$

em que:

- C_{ER} - Certificados de Emissões Reduzidas, $\text{tCO}_2\text{eq ano}^{-1}$;
- EE - Energia elétrica gerada, MWh ano^{-1} ; e
- F_{EC} - Fator de Emissão de CO₂, $(0,414 \text{ tCO}_2\text{eq MWh}^{-1})$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra a produção de mandioca no município de São Francisco de Itabapoana- RJ do ano de 2009 a 2018.



Figura 4 – Produção de mandioca em São Francisco de Itabapoana entre 2009 e 2018

Observou-se que no ano de 2012 a produção de mandioca foi de 198.000 t, nos anos seguintes de 2013 a 2018 ocorreu uma queda abrupta devido ao baixo índice pluviométrico anotados na região Norte Fluminense.

A Figura 5 apresenta o rebanho bovino no município de São Francisco de Itabapoana entre os anos de 2009 a 2018.

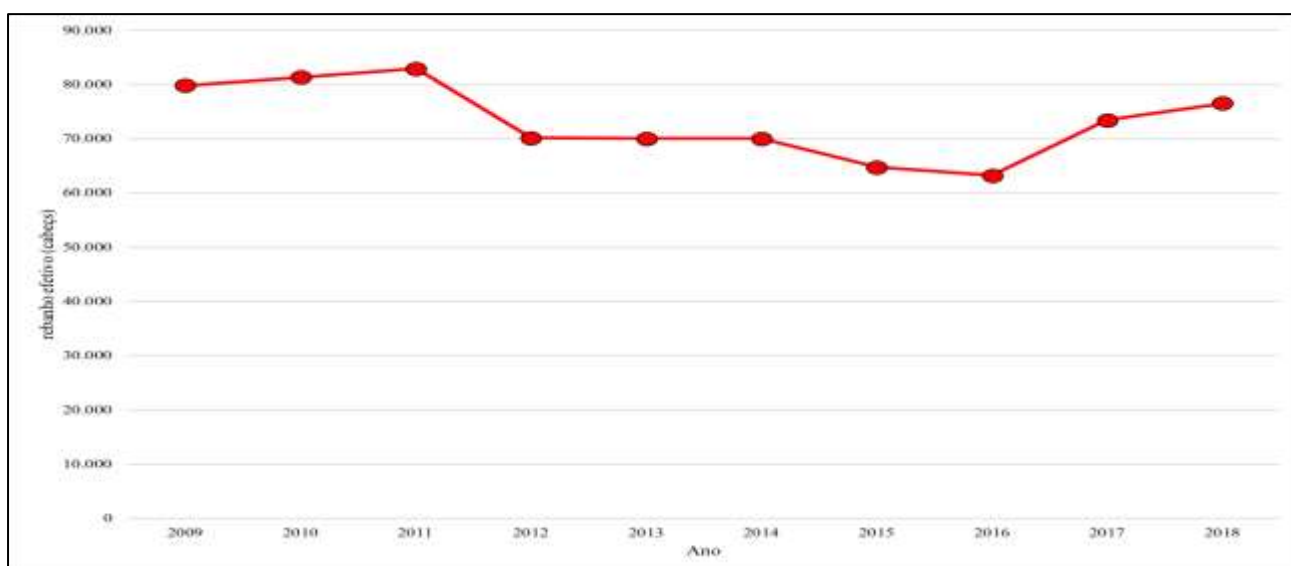


Figura 5 - Rebanho bovino no município de São Francisco de Itabapoana.

Observou-se uma diminuição no rebanho bovino no município de São Francisco de Itabapoana entre os anos de 2012 e 2016, fato que também pode ser explicado pela estiagem sofrida na região. A partir de 2017 ocorreu um aumento desse rebanho.

A Figura 6 apresenta o volume de manipueira produzido considerando-se os percentuais de 30%, 50% e 70% de mandioca produzida enviadas às Casas de Farinha do município de São Francisco de Itabapoana/RJ. O cálculo do volume de manipueira considerou a produção de mandioca do ano de 2018.

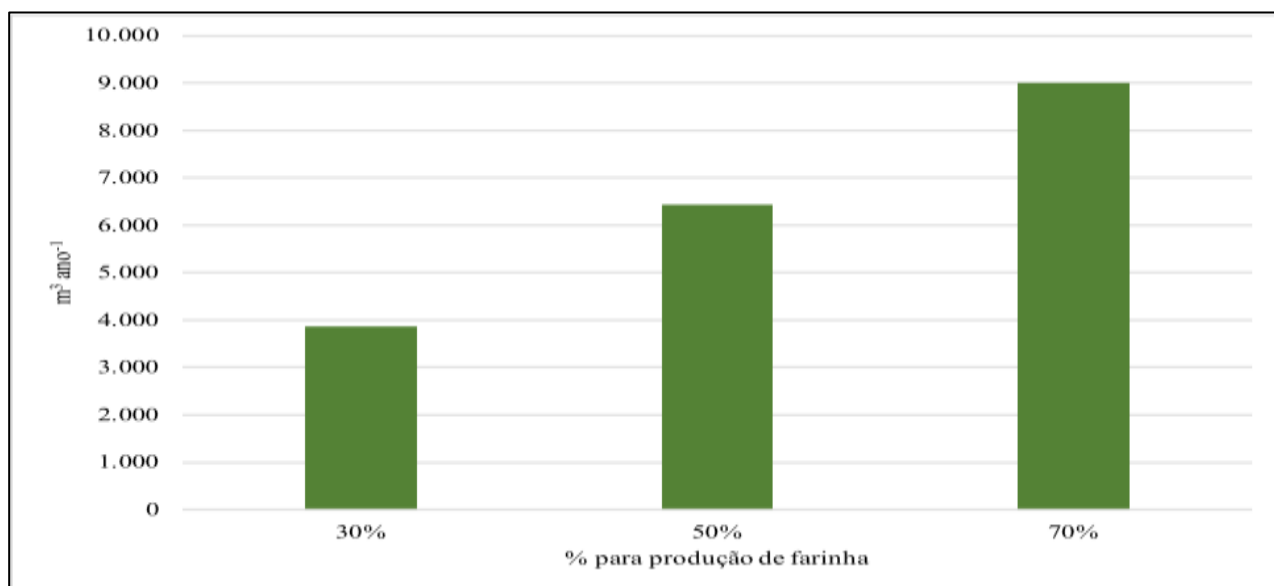


Figura 6 - Volume de manipueira produzido

Observou-se a partir da Figura 6 a estimativa dos volumes de manipueira produzido a partir do processamento da mandioca equivalentes a 3900 m³ ano⁻¹, 6500 m³ ano⁻¹ e 9000 m³ ano⁻¹ para a destinação de 30%, 50% e 70% da mandioca produzida para as Casas de Farinha. O tratamento desse resíduo por meio da codigestão anaeróbica pode mitigar os impactos ambientais que a disposição inadequada causaria.

A Figura 7 apresenta a produção de biogás e biometano obtido a partir da codigestão anaeróbica da manipueira e dejetos bovinos para cada um dos cenários.

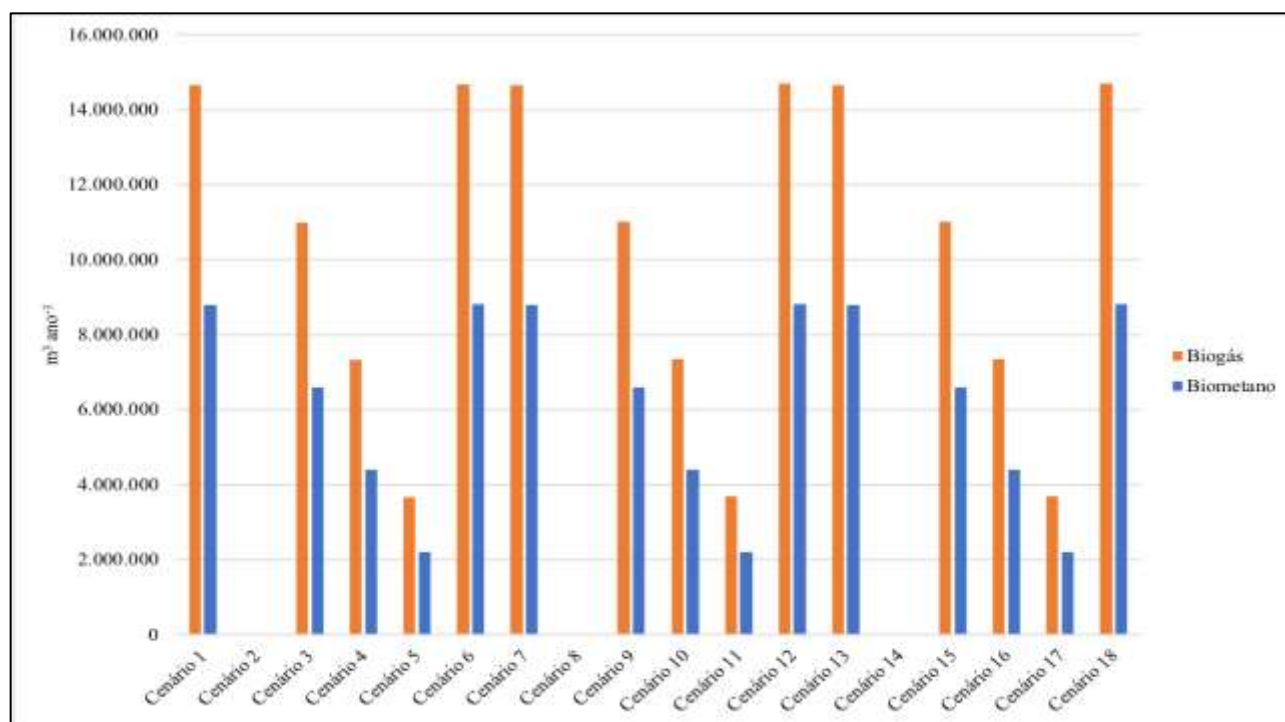


Figura 7 - Produção de biogás e biometano

A Figura 7 destaca a baixa produção de biogás e biometano para os cenários 4, 8 e 14 que correspondem aos tratamentos com 100% de manipueira. As maiores produções de biogás/biometano foram obtidas nos cenários em que o percentual de dejetos bovinos no substrato da codigestão anaeróbica é maior.

A Figura 8 apresenta a potência elétrica gerada e energia elétrica produzida a partir do biogás e do biometano obtido da codigestão da manipueira e dejetos bovinos.

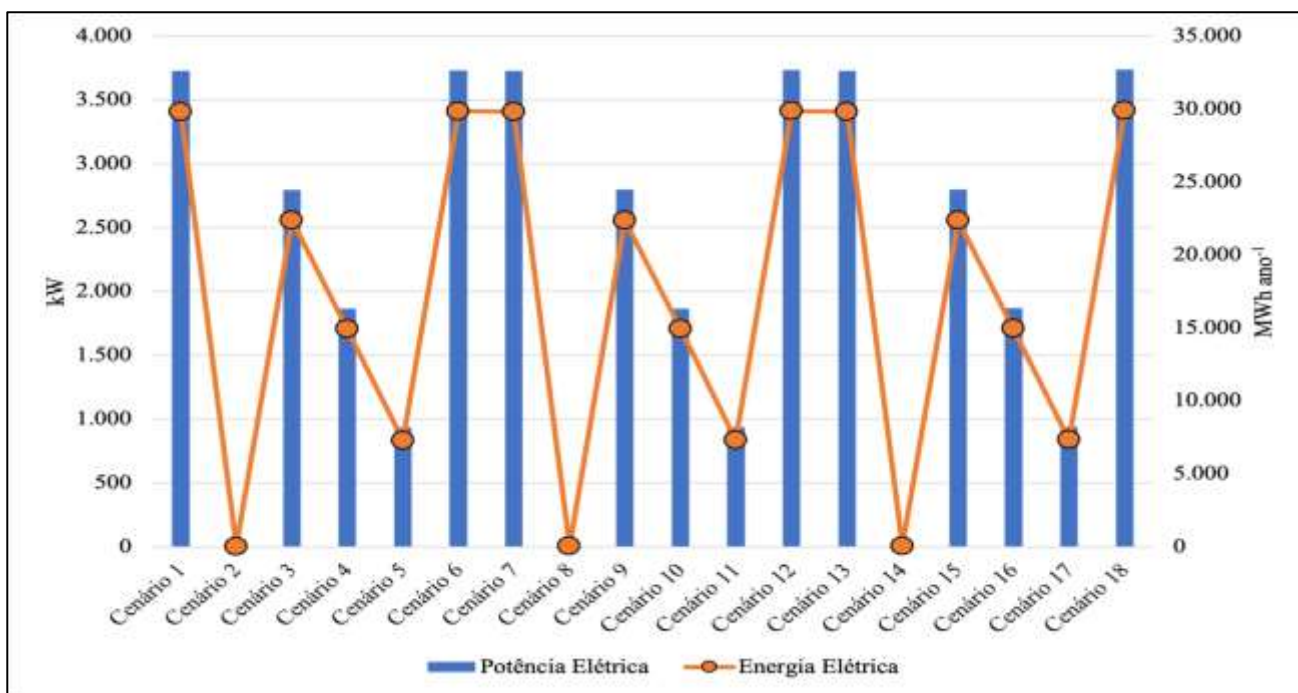


Figura 8 - Potência elétrica gerada e energia elétrica produzida a partir do biogás/biometano

Observou-se que a potência elétrica gerada e a energia elétrica produzida são diretamente proporcionais à produção de biometano apresentada na Figura 7.

A Figura 9 mostra o número de tanques de ônibus e caminhões abastecidos anualmente considerando-se o potencial de produção de biometano a partir da codigestão anaeróbica da manipueira e dejetos bovinos no município de São Francisco de Itabapoana.

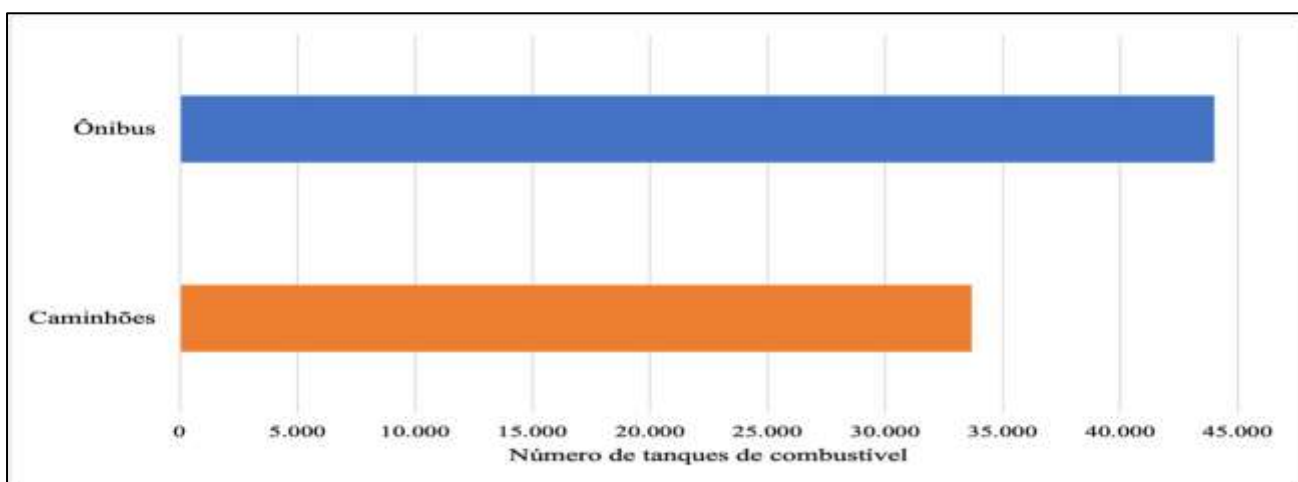


Figura 9 - Tanques de ônibus e caminhões abastecidos.

Sabe-se que no Brasil, a maior parte dos derivados de petróleo é utilizada no setor de transporte (veículos leves, transporte de cargas e transporte de passageiros). O combustível mais utilizado no transporte de passageiros, é o diesel mineral, sendo este um combustível não renovável e altamente poluente (SILVA e SOEIRO, 2014). Visando mitigar os efeitos das emissões de gases de efeito estufa associadas à combustão dos combustíveis fósseis existe a busca por substituí-los com combustíveis renováveis. Dentre os combustíveis alternativos, estão os biocombustíveis líquidos e gasosos: etanol, biodiesel, bioóleos, gás de síntese e o biogás/biometano de resíduos urbanos rurais (COSTA, 2006). Atualmente tem-se um grande número de caminhões e ônibus servindo às prefeituras em serviços de manutenção e no transporte escolar. O uso do biometano no abastecimento dos veículos, além de economia de recursos de financeiros, representa a mitigação de impactos ao meio ambiente com a redução da emissão de CO₂.

A Figura 10 apresenta a estimativa de produção de biofertilizante a partir da manipueira.

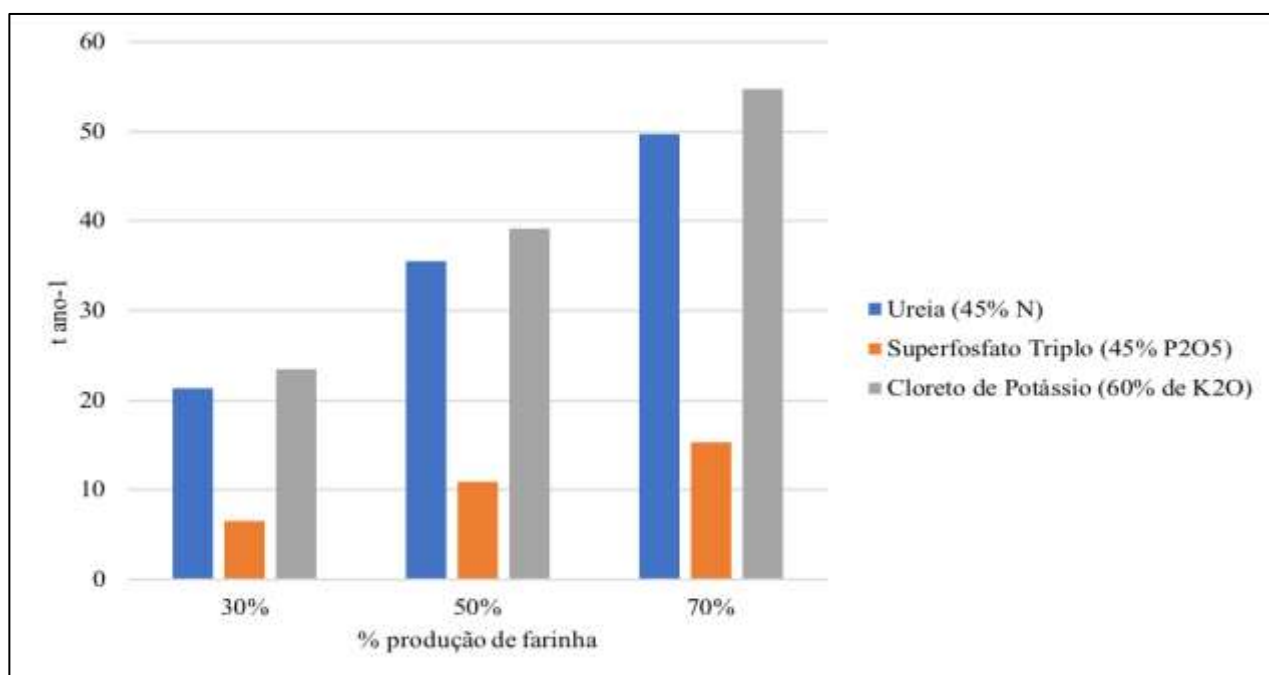


Figura 10 - Estimativa de produção de biofertilizante a partir da manipueira.

A Figura 11 apresenta a estimativa de produção de biofertilizante a partir da estimativa de dejetos bovinos disponíveis no município de São Francisco de Itabapoana.

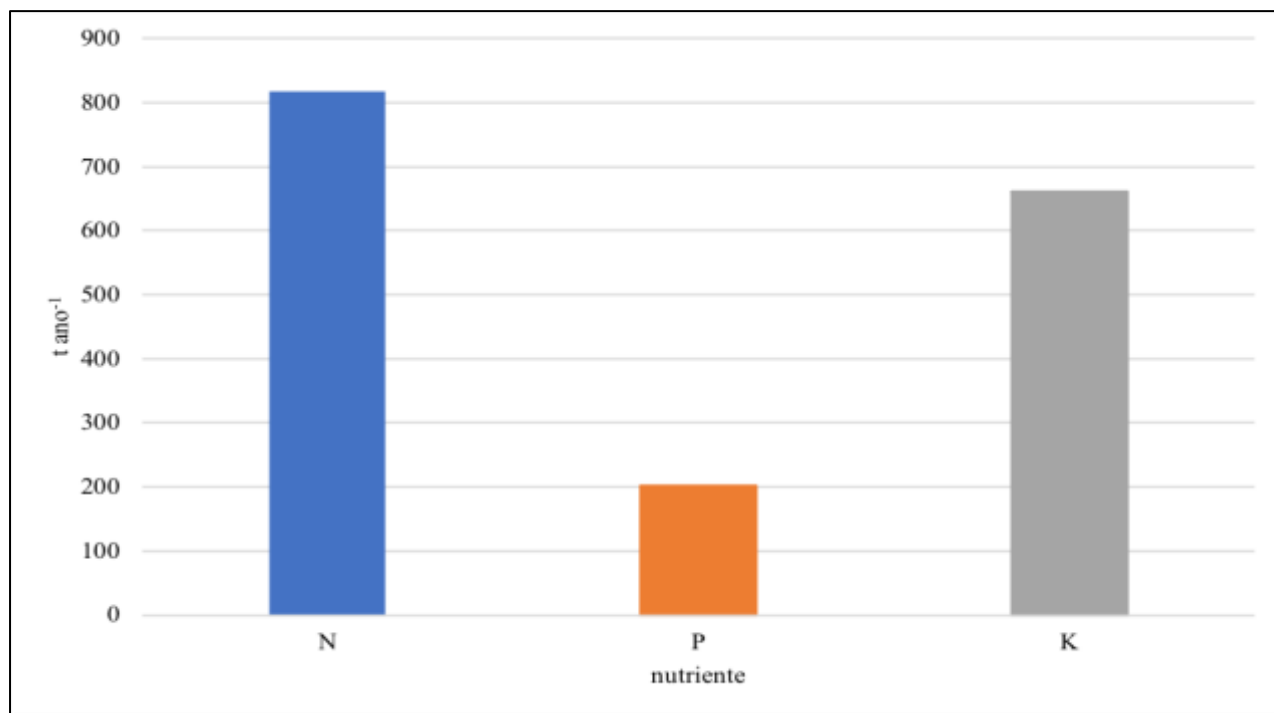


Figura 11 - Estimativa de produção de biofertilizante a partir de dejetos bovinos

Quando cultivada em solos com fertilidade média a alta, geralmente, a adubação da mandioca prevê a reposição dos principais nutrientes extraídos pela cultura, como cálcio, magnésio, nitrogênio, fósforo e potássio. Em solos com baixa fertilidade a cultura apresenta incremento de produtividade quando há uso de adubos químicos, a resposta da mandioca à adubação depende das condições do solo as maiores respostas da mandioca à adubação têm sido conseguidas com a aplicação de fósforo, potássio, nitrogênio e zinco, a adubação com fósforo e potássio, recomenda-se verificar a disponibilidade dos nutrientes em análise do solo mesmo sendo uma planta rústica e adaptada a solos de baixa fertilidade apresenta respostas significativas ao uso de adubos, com aumentos de produtividade com necessidades na ordem de: (para uma produção de 25 toneladas de raízes e parte aérea de mandioca por hectare, são extraídos 123 kg de N, 27 kg de P, 146 kg de K, 46 kg de Ca e 20 kg de Mg) havendo total necessidade de reposição. (THOMAS et al. 2016).

O uso do biofertilizante, resultante da codigestão anaeróbica, pode representar uma alternativa para a redução do custo na produção de alimentos e para a redução de impactos ambientais causados pelo uso de fertilizantes químicos (DIAS e FERNANDES, 2006).

A Figura 12 apresenta a redução da emissão de CO₂ no município de São Francisco de Itabapoana.

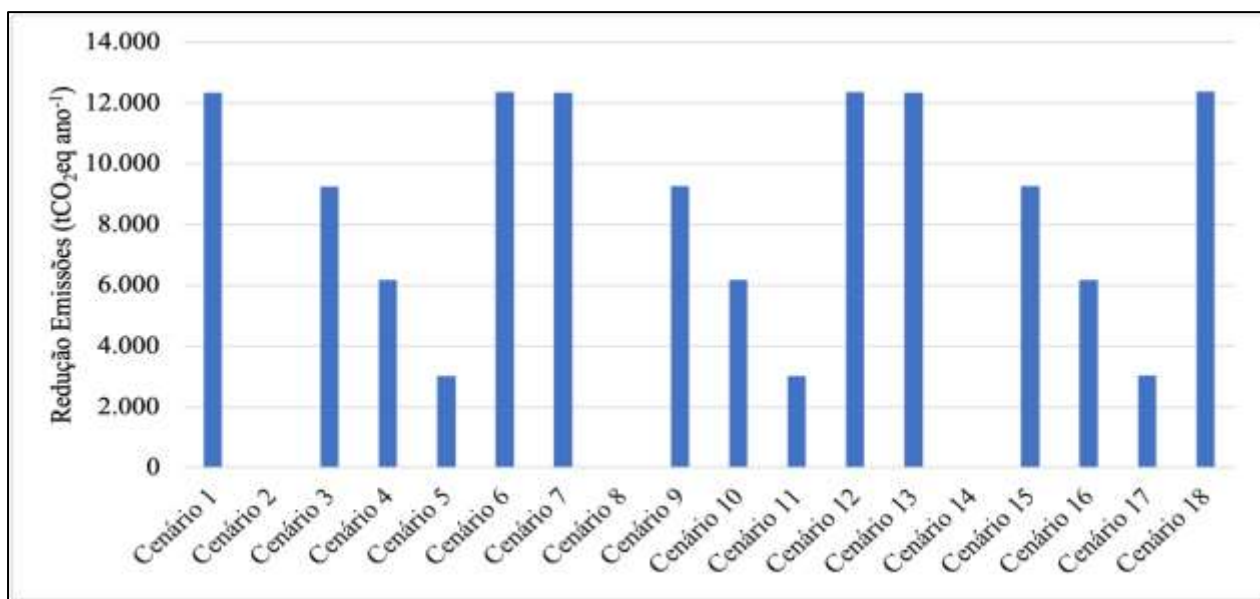


Figura 12 - Redução da emissão de CO₂

Observou-se que a redução das emissões de CO₂ foi diretamente proporcional à geração de energia elétrica a partir do biometano conforme apresentado na Figura 8. Se for considerado o uso do biofertilizante na adubação das lavouras de mandioca e também de outras culturas do município, a redução de emissões de CO₂ seria maior.

4. CONCLUSÃO

A ferramenta SAUDADE se apresentou como uma alternativa para estimar o potencial de geração de biogás/biometano por meio da codigestão anaeróbica de quaisquer resíduos agropecuários, relacionando dados da produção agropecuária e a respectiva geração de resíduos.

Os resultados obtidos por meio das estimativas realizadas mostraram que a codigestão anaeróbica pode ser uma alternativa no tratamento da manipueira e dejetos bovinos. Além dos impactos ambientais, é possível por meio da geração de energia (eletricidade e biometano veicular) contribuir para a diversificação da matriz energética municipal. O uso biofertilizante obtido a partir do digestato em substituição de adubos químicos, pode representar o fechamento de ciclo produtivo da mandioca o que torna a atividade mais sustentável ambiental e economicamente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGDAG, O.N.; SPONSA, D.T. Co-digestão de lodo industrial com resíduos sólidos municipais em reatores anaeróbicos de aterros simulados. **Revista bioquímica de Processos**, v. 40, n. 5, p. 1871-1879, 2007.
- AMARAL, C. M. C. do; AMARAL, L. A. do ; JÚNIOR, J. de L.; NASCIMENTO, A. A. do; FERREIRA, D. de S.; MACHADO, M. R. F.. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, dez 2004
- COSTA, David Freire da. **Geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto**. São Paulo, 2006. Dissertação (Programa de interunidade de Pós-graduação em energia) - Universidade de São Paulo.
- COSTA, M.S.S. M.; JUNIOR, J. de M.; COSTA, L.A. de M.; ORRICO, A. C. A.. A highly concentrated diet increases biogas production and the agronomic value of young bull's manure.. **Waste Management**, v. 48, p. 521-527, 2016.
- DIAS, V. P.; FERNANDES, E.. Fertilizantes: Uma Visão Global Sintética. **BNDES SETORIAL**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 24, p. 97-138, set 2006.
- EMATER/RIO. **Bovinocultura de corte/leite**. www.emater.rj.gov.br. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.emater.rj.gov.br/areaTecnica/RelBovi2017.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2021.
- Emater/Rio. **Escritório local: Município de São Francisco de Itabapoana**. 2019. Disponível em: . Acesso em: 10 out. 2019.
- ERTHAL, V. J. T.; FERREIRA, P. A.; PEREIRA, O. G.; MATOS, A. T. de. Características fisiológicas, nutricionais e rendimento de forrageiras fertirrigadas com água residuária de bovinocultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.14, n.5, p.458 - 466, 2010a.
- FEIDEN, A.; CEREDA, M. P. **Tratamento de águas residuárias de indústria de fécula de mandioca através de biodigestor anaeróbio com separação de fases em escala piloto**. Tese (Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Botucatu, 2001.
- FERRAREZ, A. H., PINTO, E. V., MOREIRA, M. A. C. . Estado da arte da produção de biogás a partir dos resíduos do processamento da mandioca. **INOVAE - JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY INNOVATION**, v. 8, p. 188-208, 2020.
- FIORETTO, A. M. Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca. **Fundação Gargil**, São Paulo, v. 4, p. 320, 2001.
- GALBIATTI, J. A., CAMELO, A. D., SILVA, F. G., GERARDI, E. A. B., CHICONATO, D. A. Estudo qualiquantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande , v. 14, n. 4, p. 432-437, Apr. 2010.
- HANAUER, T. V.; ANDERLE, G. A. ; HERMES, E.. Influência do uso de efluente de Processamento de Mandioca Proveniente de Biodigestor nas Características de Solo Cultivados com Soja. **Revista Brasileira de Energia Renováveis**,Paraná, v. 8, n. 2, p. 468-479, 2019.

IBGE, 2018. **Pesquisa Pecuária Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/territorio>. Acesso em: 7 abr. 2020.

IBGE, 2019 a. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 7 jul. 2020.

IBGE, 2020 a. **Pesquisa Pecuária Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** 2020 a. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/ppm/default.asp?o=27&i=P>. Acesso em: 20 jan. 2021.

IBGE, 2020 b. **Pesquisa Pecuária Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** <https://sidra.ibge.gov.br/territorio>. Disponível em: . Acesso em: 8 dez. 2020

IBGE 2020. **Pesquisa Agrícola Municipal Ano Base 2019.** Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 9 mai. 2020.

JINGURA, R.M.; MATENGAIFA, R.. Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1116-1120, 2009.

MATOS, A. T. Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos. Viçosa, MG: UFV, 2014. 241p.

MORAES, S.S. ; VIANA, M. A.; ALVES, M. G. .Patrimônio natural e cultural do município de São Francisco de Itabapoana -Estado do Rio de Janeiro. **Extensio**, v. 9, n. 13, p. 121-127, 2012.

ONUDI - Observatório de Energia Renováveis Para a América Latina e o Caribe (O Biogás), PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2016.

PANTALEO, A., DE GENNARO, B., SHAH, N. Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of Bari (Italy). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 57-70, 2013.

PASTORE, N. S. **Avaliação de diferentes fontes de nitrogênio e concentração de sacarose na produção de ácido cítrico por Aspergillus Níger usando manipueira como substrato.** Dissertação (Pós graduação em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2010.

PAULINO, P.V.R.; DUARTE, M.S.; OLIVEIRA, I.M.. Aspectos zootécnicos determinantes da qualidade de carne. *In*: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO DE RUMINANTES, 2º. 2013, Itapetinga- Bahia: Autores / Edições Uesb, 2013. 8-37 p.

POESCHL, M., WARD, S., OWENDE, P. Prospects for expanded utilization of biogas in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 7, September 2010, Pages 1782-1797.

RESEARCH AND MARKETS. Global Cassava Processing Market Report 2019: Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecasts 2011-2018 & 2019-2024. Disponível em: , Acesso em: 18 mai. 2020.

SANTOS, A. **Usos e impactos ambientais causados pela manipueira na microrregião sudoeste da Bahia-Brasil**, p. 12-25. Tese (Planificación territorial y gestión Ambiental) - Universidad de Barcelona, 2009. Disponível em: <http://www.ub.edu/medame/PSSantos.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2019.

SANTOS, K. da S. ; COELHO, E. F.; PEREIRA, M. M.; L. A. QUEIROZ. Determinação do tempo de fermentação de biofertilizantes em função do pH e da condutividade elétrica . *In: JORNADA CIENTÍFICA – EMBRAPA MANDIOCA E FRUTICULTURA* , 2016. 10ª. ed., Brasília DF. 158 p.

SILVA, R.J.; SOEIRO, E. C. Viabilidade da utilização do biogás como fonte alternativa de energia. **Runpetro**, v. 2, n. 1, p. 31-36, 2014.

SOUZA, Cecília de F. Instalações para gado de leite. **CRA/DEA/UFV**, Viçosa, 2011. Disponível em: <http://www.ufv.br/dea/ambiagro/arquivos/GadoLeiteOutubro-2004.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2020.

SUANI, S. T.; GARCILASSO, V. P.; JUNIOR, A. D. N. F.; SANTOS, M. M. dos; JOPPERT, C. L.. **Tecnologia de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo, 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/Windows/Downloads/livro-tecnologias-producao-uso-biogas-biometano.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2021.

THOMAS, P. C.; JÚNIOR, J. J. A.; SMILJANIC, K. B. A.; MATOS, F. S. A.; KUSS, G. M.; SILVA, H. D. da *et al.* Exigências nutricionais da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) 1. *In: XI SEMANA UNIVERSITÁRIA*, 2016.

ZEG. **Scania oficializa venda de caminhões a gás**. 2020 Disponível em: <https://zeg.com.br/scania-oficializa-venda-de-caminhoes-a-gas/>. Acesso em: 8 jan. 2021.