



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA
E TERRITORIO (ILATIT)**

**MESTRADO EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS NA CODIGESTÃO DE DEJETO BOVINO E
HYDRILLA VERTICILLATA DILUÍDOS EM LACTOSSORO**

VALENTINA VASQUEZ ARANGO

Foz do Iguaçu
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO
DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**MESTRADO EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS NA CODIGESTÃO DE DEJETO BOVINO E
HYDRILLA VERTICILLATA DILUÍDOS EM LACTOSSORO**

VALENTINA VASQUEZ ARANGO

Dissertação de mestrado apresentada no Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Prof. Márcia Regina Becker

Foz do Iguaçu
2022

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

A662p

Arango, Valentina Vasquez.

Potencial de geração de biogás na codigestão de dejetos bovinos e *Hydrilla verticillata* diluídos em lactossoro / Valentina Vasquez Arango. - Foz do Iguaçu, 2022.

56 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, ILATIT, PPGIES.

Orientador: Marcia Regina Becker.

1. Biogás. 2. Resíduos de animais - Reaproveitamento. 3. Digestão anaeróbia. I. Becker, Marcia Regina. II. Título.

CDU 620.954

VALENTINA VASQUEZ ARANGO

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS NA CODIGESTÃO DE DEJETO BOVINO E
HYDRILLA VERTICILLATA DILUÍDOS EM LACTOSSORO**

Dissertação de mestrado apresentada no Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dra. Márcia Regina Becker
UNILA

Prof. Dr. Thiago Edwiges
UTFPR

Prof. Dr. Michel Rodrigo Zambrano Passarini
UNILA

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Dedico este trabalho à minha família que é meu apoio incondicional. Seu amor, motivação e esforço fazem parte decada uma das minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora, Márcia, por me permitir fazer parte desta pesquisa, obrigada pela orientação e companheirismo diante das diversas circunstâncias que surgiram ao longo deste tempo e processo.

À Paula e Wagner, que foram parte fundamental de todo o processo experimental, sem seus dias de dedicação, paciência, amizade e apoio constante, isso não teria sido possível.

Agradeço a Francielle e ao CIBiogás, que sempre, gentilmente, forneceram o material inóculo para a realização dos experimentos, e a Caroline e Itaipu Brasil, que coletaram e disponibilizaram as macrófitas que foram utilizadas nos testes.

À Laryanne por compartilhar sua experiência e contatos, além de me ceder a foto da coleta de *H. verticillata*, no Lago de Itaipu.

RESUMO

Considerando o problema de geração de resíduos e produção de energia devido ao descarte e tratamento incorretos de resíduos de laticínios, bem como os efeitos nocivos gerados por grandes massas de *Hydrilla verticillata* em corpos fluviais, avalia-se o potencial de produção de biogás em um processo de digestão anaeróbia de dejetos bovinos, soro de leite e macrófita *H. verticillata*, que permitirá a redução dos impactos ambientais gerados na pecuária leiteira. Um teste de potencial metanogênico foi desenvolvido nas condições estipuladas pela norma VDI 4630 com triplicatas de amostras de (i) inócuo, (ii) lactossoro, (iii) esterco bovino, (iv) *H. verticillata*, (v) codigestão de macrófitas com esterco e (vi) codigestão de macrófitas, esterco e lactossoro. Os resultados obtidos indicam que substituição da água ou solução tampão, pelo soro no processo codigestivo de esterco bovino e a macrófita, mostraram um aumento na produção de biogás de 43,06 mL a 102,89 por grama de sólidos voláteis, mais de um 100% de incremento. Assim, este trabalho sem precedentes, relacionado ao processo codigestivo de estes três substratos, mostra alta viabilidade para o seu aproveitamento energético, diminuição no impacto dos dejetos de laticínios e um tratamento adequado para as macrófitas invasoras do lago de Itaipu.

Palavras-chave: biogás; digestão anaeróbica; codigestão; macrófitas; dejetos bovinos leiteiros.

RESUMEN

Considerando la problemática de generación de residuos y producción de energía por la incorrecta disposición y tratamiento de los residuos de lechería, así como los efectos nocivos generados por grandes masas de *Hydrilla verticillata* en cuerpos fluviales, se evalúa el potencial de producción de biogás en un proceso de digestión anaeróbica de desechos bovinos, suero de leche y la macrófita *H. verticillata*, lo que permitirá la reducción de los impactos ambientales generados en la ganadería lechera. Se desarrolló una prueba de potencial metanogénico bajo las condiciones estipuladas por la norma VDI 4630 con muestras por triplicado de (i) inocuos, (ii) lactosuero, (iii) estiércol bovino, (iv) *H. verticillata*, (v) codigestión de macrófita con estiércol y (vi) codigestión de macrófita, estiércol y lactosuero. Los resultados obtenidos indican que la sustitución de agua o solución tampón por suero en el proceso codigestivo de estiércol bovino y macrófita mostraron un aumento en la producción de biogás de 43,06 mL a 102,89 por gramo de sólidos volátiles, es decir, más de un 100% en incremento. Así, este trabajo sin precedentes, relacionado con el proceso codigestivo de estos tres sustratos, muestra alta viabilidad para su aprovechamiento energético, reducción del impacto de desechos lácteos y tratamiento adecuado para las macrófitas invasoras en el lago de Itaipú.

Palabras claves: biogás; digestión anaeróbica; codigestión; macrófitas; desechos bovinos lecheros.

ABSTRACT

Considering the problem of waste generation and energy production due to the incorrect disposal and treatment of dairy waste, as well as the harmful effects generated by large masses of *Hydrilla verticillata* in river bodies, the potential for biogas production in a process of anaerobic digestion of bovine manure, whey and macrophyte *H. verticillata*, will allow the reduction of environmental impacts generated in dairy farming. A methanogenic potential test was performed under the conditions stipulated by the VDI 4630 standard with triplicate samples of (i) innocuous, (ii) whey, (iii) bovine manure, (iv) *H. verticillata*, (v) co-digestion of macrophytes with manure and (vi) co-digestion of macrophytes, manure and whey. The results obtained indicate that the replacement of water or buffer solution by whey in the co-digestive process of bovine manure and macrophytes, showed an increase in the production of biogas from 43.06 mL to 102.89 per gram of volatile solids, more than 100% of increment. In addition, this unprecedented work, related to the co-digestive process of these three substrates, shows high viability for their energy use, decreasing the impact of dairy waste and providing an adequate treatment for the invasive macrophytes of Itaipu Lake.

Key words: biogas; anaerobic digestion; codigestion; macrophytes; dairy bovine waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Esquema da estrutura de uma biomassa lignocelulósica.	21
Figura 2.	Morfologia da <i>H. Verticillata</i> .	23
Figura 3.	Processo da digestão anaeróbia.	26
Figura 4.	Curvas de produção de biogás.	30
Figura 5.	Esquema de um eudiômetro.	32
Figura 6.	Localização da propriedade de coleta de esterco e lactossoro.	34
Figura 7.	Esquema do aparato experimental utilizado no teste de BMP.	41
Figura 8.	Produção periódica de biogás nas amostra de monodigetão.	43
Figura 9.	Volume produzido de biogás (mL) em mono e codigestões.	44
Figura 10.	Produção periódica média de biogás para as amostras de codigestão (mL).	44
Figura 11.	Produção média acumulada de biogás (mL/SV).	46
Figura 12.	Comparativo da produção média acumulada de biogás (mL) entre Soro, Co_M_D e Co_M_D_S.	47

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1.	<i>H. verticillata</i> no lago de Itaipu.	23
Fotografia 2.	Amostras de monodigestão em (a) massa úmida, (b) secadas a 105 °C e (c) calcinadas a 550 °C.	36
Fotografia 3.	Preparação do inóculo em banho Maria a 37°C.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Composição média do dejetos bovino.	18
Tabela 2.	Composição do soro de leite.	19
Tabela 3.	Potencial metanogênico e frações volumétricas segundo o tipo de substrato.	20
Tabela 4.	Teor de ST e SV de diferentes substratos.	29
Tabela 5.	Condições para ensaios de ST, SF e SV.	35
Tabela 6.	Cálculo para caracterização dos substratos.	36
Tabela 7.	PH dos substratos.	37
Tabela 8.	Cálculo das massas úmidas dos componentes do reator.	39
Tabela 9.	Teor de sólidos voláteis dos substratos e afluentes.	40
Tabela 10.	Massa de substratos usados para testes de biodigestão.	40
Tabela 11.	Teor de ST dos substratos.	42
Tabela 12.	Volume de biogás produzido nas mono e codigestões.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 BIOMASSA DE ORIGEM ANIMAL	17
2.2 BIOMASSA DE ORIGEM VEGETAL	20
2.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA	24
2.3.1 Parâmetros e condições apropriadas para a digestão anaeróbia	26
2.4 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	28
2.5 TESTE DE POTENCIAL BIOQUÍMICO METANOGENICO (BMP)	29
2.5.1 Eudiômetro	31
3. OBJETIVOS	33
3.1 OBJETIVO GERAL	33
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
4. METODOLOGIA	34
4.1 COLETA DE SUBSTRATOS	34
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS	35
4.3 PREPARAÇÃO DO INOCULO	37
4.4 TESTE DE POTENCIAL METANOGENICO	38
4.5 APARATO EXPERIMENTAL	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6. CONCLUSÕES	49
7. TRABALHOS FUTUROS	50
8. REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energia e alimentos, causada pelo atual crescimento populacional e a necessidade de melhoria na qualidade de vida de grande parte destas populações, consistem em um desafio, tanto para produção de energia e alimentos como para o gerenciamento das consequências ecológicas e econômicas causadas. Esta crescente demanda por energia e alimentos pode agravar os problemas ambientais já existentes, como variações recordes nas temperaturas da terra e do oceano, e por isto soluções para mitigar esses problemas precisam ser pensadas (NASA, 2018; ONU, 2022).

Na produção pecuária o mau gerenciamento dos resíduos produzidos gera poluição na terra, na água e no ar. Segundo dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, o gado, por exemplo, é responsável por gerar 18% dos gases de efeito estufa (NASA, 2018). O nitrogênio e o fósforo, presentes em seus dejetos, podem contaminar os corpos de água. Particularmente o fósforo pode estimular a proliferação de algas e plantas aquáticas, agravando ainda mais o problema causado por aquelas consideradas invasoras, como a macrófita *Hydrilla verticillata* (Pérez B., 2017).

Além do impacto ambiental causado pela deposição inapropriada dos seus dejetos, na cadeia produtiva animal, mais especificamente na produção dos queijos, há aquele causado pelo descarte do principal subproduto da sua fabricação, o soro de leite. Estima-se que sejam gerados cerca de seis litros de soro de leite para cada quilo de queijo produzido. A composição principal deste subproduto é a água, mas ele também é rico em matéria orgânica, como lactose, gorduras e proteínas, e pode impactar o meio ambiente descartado sem tratamento prévio (Barrena, 2022).

Uma visão mais periférica da problemática ambiental causada por dejetos e subprodutos da agropecuária depositados na natureza de forma errada, mas que mantém uma inter-relação com tema, se refere aos cuidados que temos que ter com os corpos d'água. Alguns deles, que serão especificados mais adiante, são coabitados por plantas aquáticas invasoras que podem afetar, de forma mais negativa do que positiva, estes ecossistemas (Rodrigues, 2020). Uma das

macrófitas é a *H. verticillata*, planta nativa da África Central, que atingiu vários corpos de água nas Américas e que, devido ao seu rápido crescimento e capacidade de sobrevivência em diferentes ambientes, chegou logo ao Brasil. A sua capacidade de produzir enorme quantidade de biomassa pode resultar na eutrofização do ambiente aquático e na morte de espécies nativas, na obstrução de tubulações de coleta e distribuição de água e na navegabilidade (DAE, 2022).

A biomassa do dejetos bovino, do soro da produção de queijo e as macrófitas, pode ser tratada para produzir energia renovável. O tratamento desta matéria orgânica pode ser realizado por meio de um processo de biodigestão anaeróbia. Este processo consiste na degradação biológica da matéria orgânica, por parte de uma comunidade microbiana (arqueas e bactérias) que, em ausência do oxigênio, convertem-na em biogás e biofertilizante.

Além de reduzir a carga orgânica gerada pelos resíduos da produção animal, pelos subprodutos da produção de queijo e pela biomassa vegetal, a biodigestão anaeróbia também produz o biogás, um recurso energético que pode ser utilizado para gerar eletricidade, calor ou biometano. Quando biogás é produzido a partir destes resíduos, além de permitir seu tratamento correto, evitando problemas de contaminação, ele atribui um valor agregado aos resíduos. Além da obtenção de biogás, o processo de digestão anaeróbia também fornece um efluente tratado, chamado digestato, que pode ser usado como fertilizante na produção agrícola (Barrena, 2022; Rodrigues, 2020; DAE, 2022).

O biogás é composto principalmente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), cuja proporção depende dos substratos que são submetidos ao processo de digestão anaeróbia, podendo, ainda, ter traços de ácido sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2) e vapor d'água. A biodigestão da matéria orgânica é influenciada pela fonte de biomassa utilizada devido às suas características físicas e químicas como a relação carbono e nitrogênio, a umidade, os sólidos voláteis, a granulometria e sua biodegradabilidade (Rodrigues, 2020).

Diferentes substratos podem ser tratados ao mesmo tempo, sendo que na codigestão anaeróbia o processo é favorecido por conta do aumento na variedade microbiana, provocando um expressivo aumento na taxa de produção de biogás e

uma melhor qualidade dos biossólidos produzidos, o digestato (Triscari, 2009). Estudos desenvolvidos por Triscari et al (2009), Buss (2015), Lins (2017) e Rodrigues (2020) mostram resultados positivos em processos de codigestão anaeróbia entre macrófitas e outros tipos de plantas com dejetos bovinos. Destes, apenas Rodrigues (2020) realiza uma avaliação do processo de codigestão da *H. verticillata* e de dejetos bovinos. Como um precedente da codigestão anaeróbia de dejetos bovinos, soro de leite e macrófitas, registra-se o trabalho de Barrena *et al.* (2015), que testaram diferentes proporções de soro de leite, utilizando a planta *Scirpus californicus*. Entretanto, não há referências de trabalhos realizados com a *H. verticillata*.

Considerando a problemática da geração de resíduos e a da produção de energia pela biodigestão, este estudo visa avaliar o potencial de produção de biogás em um processo digestivo de dejetos bovinos, soro de leite e a macrófita *H. verticillata*. Entendemos que este processo permitirá uma redução dos impactos ambientais gerados na pecuária leiteira, tanto diretamente no solo, no ar e na água, como o impacto indireto resultando na proliferação das espécies invasoras de macrófita. Além do mais, irá atribuir um valor agregado aos resíduos bovinos e seus subprodutos, e oferecerá uma alternativa para mitigar o impacto da *H. verticillata* nos corpos d'água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BIOMASSA DE ORIGEM ANIMAL

Atualmente, a população mundial é de 7,8 bilhões de pessoas e espera-se que alcance 9,7 bilhões até 2050 (Roser, 2019). Uma das consequências desse aumento populacional, como explica Lins (2017), corresponde ao aumento das atividades agrícolas e pecuárias para produção de alimentos e, junto a elas, a da quantidade de resíduos e o impacto ambiental causado pelo seu descarte inadequado.

Entre as atividades pecuárias de grande relevância em todo o mundo, encontramos a pecuária leiteira. Segundo dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO (2021), em 2020 foram produzidas cerca de 906 milhões de toneladas de leite em todo o mundo, com um crescimento de 2,0 % em comparação com o ano anterior (Food agriculture organization, 2022; IBGE, 2021). O Brasil está entre os países com maior número de vacas leiteiras e, em 2020, o número do rebanho bovino aumentou 1,5 %, o mesmo percentual em relação ao aumento da produção de leite, que atingiu um recorde de 35,4 bilhões de litros (IBGE, 2021; Vera-Romero, 2022).

De acordo com Machado (2009) e Vera-Romero e colaboradores, (2014), um bovino adulto pode produzir entre 10 kg a 15 kg de dejetos por dia, e a composição deste dejetos pode variar de acordo com a ração recebida pelo animal. Sua constituição varia entre 45,5% - 48,9% de matéria orgânica e, em menores percentuais, por nitrogênio, fósforo e potássio, substâncias necessárias para a nutrição do solo e que são utilizadas para a produção de adubos. A Tabela 1 apresenta a composição percentual desses elementos em dejetos bovinos.

Tabela 1. Composição média do dejetos bovino.

Composição	Matéria seca (%)
Matéria orgânica	45,50 - 48,9
Nitrogênio total	1,27 - 2,31
Fósforo	0,81
Potássio	0,84 - 2,76

Fonte: Vera-Romero, 2014; Toala Moreira, 2014.

Esses dejetos, quando não tratados adequadamente e na presença de microrganismos, liberam amônia e gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, incluindo o metano e o óxido nitroso. O gás metano pode ser considerado 23 vezes mais poluente que o dióxido de carbono e os dejetos bovinos contribuem com 16% da sua emissão global. Já o óxido nitroso é 296 vezes mais potente do que o dióxido de carbono e o dejetos bovino contribui com 25% das suas emissões. Por fim, a amônia contribui com 50% das emissões globais (Valencia 2022).

Quando o soro de leite é descartado sem nenhum tratamento, têm impactos no meio ambiente, propiciando o crescimento de microrganismos e o aumento da demanda biológica de oxigênio (DBO) e da demanda química de oxigênio (DQO) na água [15]-[16]. Um litro de leite equivale a uma contribuição de DBO de 110.000 mg/L e uma DQO de 220.000 mg/L. A descarga inadequada de qualquer composto com alta demandabioquímica de oxigênio, como o soro de leite, em um ecossistema aquático como aquíferos, faz com que os macro-organismos que o degradam utilizem grande quantidade do oxigênio dissolvido presente nas águas subterrâneas, produzindo odores fétidos devido à putrefação e causando a contaminação dos ecossistemas (Carranza, 2022). No Peru, o descarte inadequado do soro gerou contaminação de aquíferos e nascentes em áreas montanhosas (Carranza, 2022).

O soro de leite é um subproduto obtido a partir do processo de coagulação do leite na produção de queijo. Estima-se que a cada 10 L de leite produzido sejam obtidos de 8 a 10 kg de soro e, embora sua composição varie de acordo com com a

alimentação e o tipo de animal, em média, os compostos hidrossolúveis contém 95 % de lactose, 25 % de proteína e 8 % de gordura láctea. Sua composição média é mostrada nas Tabela 2 em concentrações expressas em percentuais e/ou g/L (Valencia, 2022; Rodriguez 2022).

Por serem compostos simples, de alto valor energético e facilmente degradáveis, as gorduras e proteínas permitem uma alta e rápida produção de biogás. Do exposto, destaca-se que apesar de possuir alto teor de água, o soro contém lactose e gordura, compostos promissores para a produção de biogás (Vera-Romero, 2022).

A tabela 3 mostra como as proteínas possuem maior potencial metanogênico em relação aos carboidratos e gorduras, praticamente dobrando esse potencial, além de apresentarem maior fração volumétrica de metano (VDI, 2006).

Tabela 2. Composição do soro de leite.

Composição	Quantidade (%)	g/L
Sólidos totais	6,9	63 – 70
Água	93,1	931
Lactose	4,9	44 – 52
Proteína	0,9	6 – 10
Gorduras	0,3	0 – 5
Outros	0,8	0,8 - 1,6

Fonte: Pinos-Rodriguez, 2012; Valencia, 2009.

Tabela 3. Potencial metanogênico e frações volumétricas segundo o tipo de substrato.

Tipo de substrato	Potencial teórico de Biogás (L/Kg de SV)	Fração volumétrica teórica CH₄ / CO₂ (%)
Carboidratos	750	50 / 50
Grasas	1390	72 / 28

Fonte: VDI, 2006.

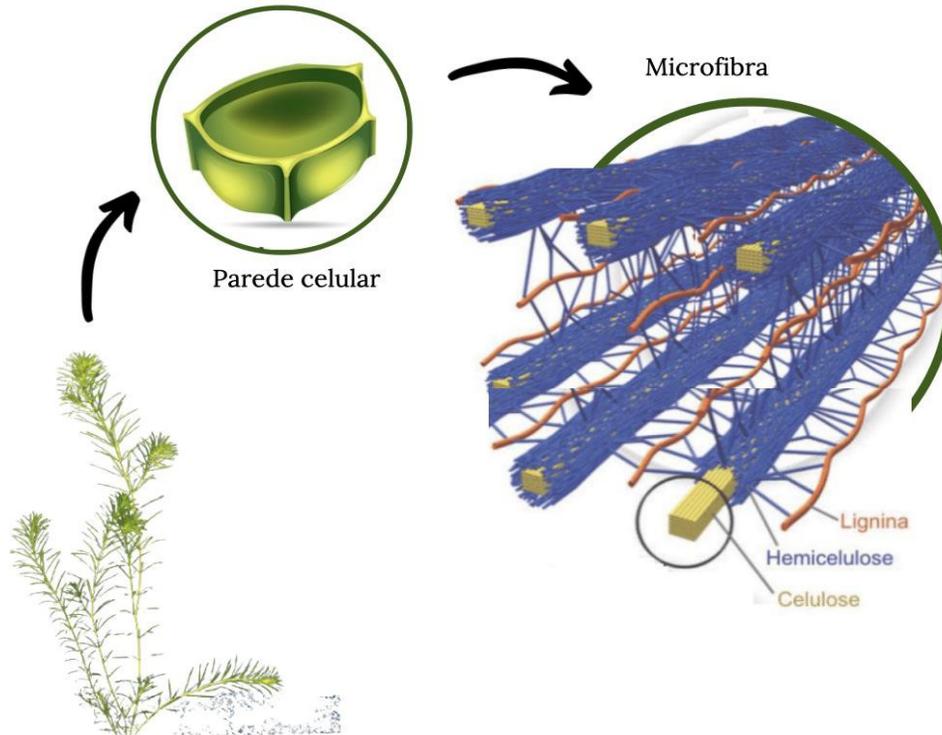
2.2 BIOMASSA DE ORIGEM VEGETAL

A biomassa vegetal ou lignocelulósica (Figura 1.), é considerada um substrato composto, principalmente, de celulose, hemicelulose e lignina, sendo, os dois primeiros, polímeros com estruturas complexas de difícil digestão por microrganismos anaeróbios (Gueri, 2020; Pompeo, 2022; Xavier, 2014).

A celulose é um polímero semicristalino formado por ligações B-1,4-glicosídeos e cadeias de glicose, cujas regiões cristalinas são mais difíceis de quebrar. A hemicelulose é um polímero de estrutura complexa formado por polissacarídeos de pentoses, hexoses e açúcar que, para ser hidrolisado, requer a ação de diversas enzimas como as produzidas pelo fungo *Aspergillus versicolor* (Gueri, 2020).

A lignina é o polímero que gera a rigidez das plantas e compõe entre 20% e 30% do peso seco da parede celular. É um polímero de estrutura amorfa e de grande complexidade, aromático reticulado, insolúvel em água, que consiste em três unidades de fenil-propano unidas por ligações éter e carbono-carbono, que protegem a celulose da degradação na natureza e dificultam a utilização da lignocelulose para produção de biocombustíveis. Tem uma maior capacidade de adsorção de enzimas hidrolíticas do que os carboidratos, aumentando assim a dificuldade dos processos de hidrólise enzimática. Além disso, a lignina cobre a superfície da celulose para reduzir sua acessibilidade, o que leva a aumentar significativamente o custo da enzima na etapa de sacarificação na produção de biocombustíveis lignocelulósicos (Gueri, 2020; Pompeo, 2022; Xavier, 2014; Deng, 2019; Ogeda, 2010).

Figura 1. Esquema da estrutura de uma biomassa lignocelulósica.



Adaptado de: Gueri, 2020.

Entre a grande variedade de biomassas vegetais, encontramos aquelas do tipo macrófitas, plantas aquáticas que podem estar parcial ou totalmente submersas na água. Apresentam crescimento rápido e impactam grandemente o ambiente que ocupam. Sua presença nos corpos d'água pode influenciar na navegabilidade das vias, causar sombras em corpos d'água, deslocar plantas nativas e modificar ecossistemas (Invasive, 2022; Associação brasileira de limnologia, 2022; Kuczman, 2018). No Brasil, estudos sobre presença de macrófitas invasoras apontam que a espécie *Eichhornia crassipes* pode gerar ilhas na superfície das águas que dificultam a sua navegabilidade e que também aumentam a evaporação d'água, de duas a oito vezes, em relação a uma superfície aquática livre dessas plantas. Já a *Hydrocharitaceae egeria densa* pode causar obstrução nas turbinas de usinas hidrelétricas, como a de Paulo Afonso, no estado da Bahia (Xavier, 2022). Nos Estados Unidos, a mesma espécie invasora de corpos de água doce, *H. egeria densa* chegou a ocupar uma área de aproximadamente dez hectares em Carolina do Norte, impedindo a navegabilidade, a

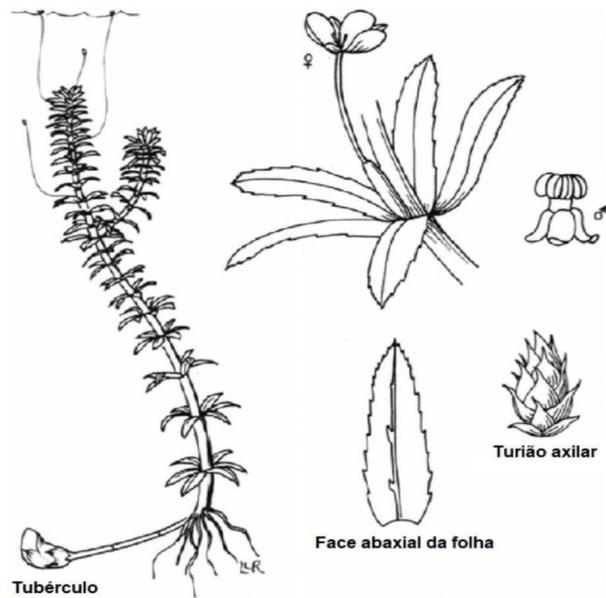
pesca e modificando o ecossistema. A *H. verticillata*, uma espécie nativa da África que invade o Rio Potomac, em Washington, desde os anos 80, mas está documentada em todo o sul do país, desde a Califórnia até Delaware. Esta planta, com efeitos semelhantes aos de *Egeria densa*, tem chegado a gerar proibições de visitação nos lagos e trechos de rios que ocupam. Atualmente estão sendo realizadas pesquisas sobre o uso potencial dessa planta para armazenamento de carbono (Invasive, 2022; Associação brasileira de limnologia, 2022; Kuczman, 2018).

A *H. verticillata*, é uma angiosperma monocotiledônea da família *Hydrocharitaceae*, que é altamente persistente e competitiva (Souza, 2021). Possui reprodução sexuada e assexuada, sistema de rizomas desenvolvido e tolera grandes mudanças ambientais, como temperatura, salinidade, pH e luz. Por tanto, esta planta se destaca por ser altamente adaptável e resistente, o que a levou a ser considerada uma das espécies aquáticas invasoras mais nocivas do mundo (Rodrigues, 2020; Invasive, 2022; Associação brasileira de limnologia, 2022; Kuczman, 2018; Souza 2021; Jain, 2018).

Em sua morfologia, apresentada na Figura 2, a *H. verticillata* apresenta folhas verdes e pontudas com bordas irregulares, caule largo, delgado, ramificado e espiralado que pode atingir 25 m de comprimento, e contando quatro folhas em cada nó. As flores são brancas e pequenas (caule 5 mm). Possui rebentos e tubérculos que lhe conferem resistência e facilitam a sua regeneração. O desenvolvimento de um único tubérculo é capaz de produzir cerca de 700 tubérculos por metro quadrado. Além disso, pode se espalhar rapidamente por fragmentação, isto é, com pequenas seções de caule pode haver formação de raízes e desenvolvimento de plantas independentes (Kuczman, 2018; Souza 2021; Jain, 2018; Gettys, 2021).

Na bacia do rio Paraná, no Brasil, onde se encontra a hidrelétrica de Itaipu, tem sido identificado mais de 64 tipos de plantas aquáticas, dentre as que se encontra a *H. verticillata* (Thomas, 2003). Desde que foi identificada a primeira vez em 2005, se espalhou em menos de dois anos ao longo de quase 300 km, colonizando grandes áreas e afetando várias espécies de peixes no ecossistema. A Fotografia 1 mostra a coleta de *H. verticillata* no Lago de Itaipu.

Figura 2. Morfologia da *H. Verticillata*.



Fonte: Souza, 2011.

Fotografia 1. *H. verticillata* no lago de Itaipu.



Fonte: Acervo pessoal Rodrigues, 2019.

Devido às consequências geradas pelos grandes corpos de macrófitas, se faz necessário o controle destas populações. Uma das formas de controle consiste na remoção manual ou mecânica das plantas. Entretanto, deve definir-se uma destinação final apropriada. Uma das formas de aproveitamento desta biomassa é a produção de biocombustíveis, como o biogás produzido a partir de um processo de digestão anaeróbia (Pompeo, 2020).

2.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA

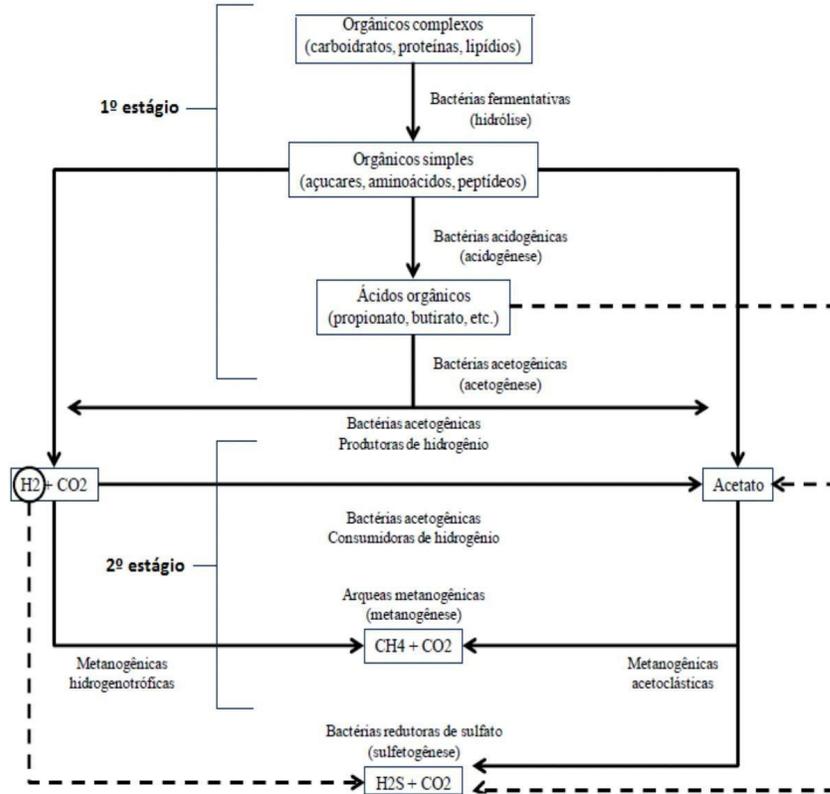
A digestão anaeróbia é um processo de degradação biológica na ausência de oxigênio. Ao longo deste processo, microorganismos como arqueobactérias e bactérias transformam compostos orgânicos complexos em compostos cada vez mais simples, através de uma série de estágios que tem como insumo o produto do estágio anterior. O resultado final da digestão anaeróbia é a transformação da matéria orgânica em biogás e biofertilizante. A composição do biogás é constituída, principalmente, de metano e gás carbônico, podendo conter, também, ácido sulfúrico, amônia, hidrogênio e vapor de água (Xavier, 2022).

Como mostrado na Figura 3, a digestão anaeróbia ocorre em quatro estágios: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A hidrólise é considerada a etapa mais limitante do processo de digestão, especialmente tratando-se de substratos vegetais, devido às suas características recalcitrantes dadas pelas cadeias lignocelulósicas. Antes desta etapa, podem ser aplicados pré-tratamentos da biomassa, que quebram os polímeros complexos, facilitando a atuação dos microorganismos e suas enzimas (Xavier, 2022; Kuczman, 2022). Na hidrólise, organismos fermentativos como *Streptococcus*, *Lactobacillus*, *Bacillus*, *Staphyococcus* e *Clostridium*, digerem os polímeros complexos, produzindo como resultado ácidos graxos, peptídeos e polissacarídeos. Estes compostos, por sua vez, são digeridos por outros microorganismos fermentativos (como *Bacteroidetes*, *Cloroflexi*, *Firmicutes* e *Proteobacteria*) durante a acidogênese, produzindo ácidos orgânicos. Logo, organismos acetogênicos (como *Acetobacterium*, *Syntrophomonas*, etc) produzem hidrogênio, dióxido de carbono e acetatos a partir dos ácidos orgânicos no processo de acetogênese. Finalmente, na metanogênese, arqueobactérias metanogênicas utilizam

estas moléculas para a produção de metano (Kuczman, 2022).

As *archaeas* metanogênicas são micro-organismos extremófilos, que crescem e se desenvolvem em ambientes anaeróbios. Estes micro-organismos são filogeneticamente diversos, podendo ser classificados em seis ordens: Metanobacterias, Metanococas, Metanocellales, Rice Cluster, Metanomicrobianos e Methanopyrales. Estes grupos se diferenciam, principalmente, a partir do substrato e do processo pelo qual ocorre a produção de metano. De forma geral, a metanogênese pode ocorrer de duas formas: as *archaeas* metanogênicas consumidoras de acetato (*Methanosacrina* e *Methanosaeta*) produzem metano e dióxido de carbono por meio da clivagem das moléculas de acetato; enquanto a produção de metano pelas *archaeas* consumidoras de hidrogênio (*Methannospirillum*, *Methanocullesti* e *Methanoculleus*) ocorre por meio da redução do dióxido de carbono e hidrogênio (formando também água) (Ramirez, 2021; Xavier, 2022; Kuczman, 2022).

Figura 3. Processo de digestão anaeróbia.



Fonte: Gueri et al, 2020.

2.3.1 Parâmetros e condições apropriadas para a digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia é dado pela ação de microrganismos vivos sobre a matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio. A produção de biogás ocorre em condições favoráveis à ação desses microrganismos, sendo importante controlar parâmetros que afetam seu desenvolvimento, tais como a temperatura, o pH e a composição de matéria orgânica e inorgânica do substrato.

2.3.1.1 Ph

O pH refere-se ao nível de acidez e alcalinidade do processo e sua importância na biodigestão é dada pelo fato de que uma mudança drástica no pH mostra instabilidade no sistema, o que afeta a população microbiana e a eficiência do sistema (Drosg, 2021).

Espera-se que os valores de pH permaneçam próximos ao neutro (7), entretanto, de acordo com Onudi (2013), os valores ótimos para bactérias fermentativas são 7,2 - 7,4, para bactérias acetogênicas 6,0 - 6,2 e para os organismos metanogênicos 6,5 - 7,5. Testes bioquímicos de metano (BMP) como os desenvolvidos por Cerón-Vivas (2019), mostram que a maior produção de biogás é dada com níveis de pH próximos de 7,0, sendo que a maior produção de metano obtidas nos experimentos com águas residuais ocorreu em valores de pH de 7,5.

2.3.1.2 Temperatura

A temperatura do processo de biodigestão afeta a cinética das reações microbianas, podendo acelerá-las ou mesmo inativá-las. De acordo com a temperatura na qual os microrganismos podem realizar a digestão, eles são classificados como termófilos (45°C - 70°C), mesófilos (20°C - 45°C) ou psicrófilos (0°C - 20°C). Sistemas de controle térmico são necessários para os reatores, incluindo sistemas de isolamento, sensores, adição e/ou troca de calor, que permitem manter as variações de temperatura em valores não superiores a 3°C (Gaio, 2020).

Wang e colaboradores (2019), avaliaram a influência da temperatura na eficiência da produção de biogás e na estrutura da comunidade microbiana em codigestão de esterco de vaca e palha de milho. Os resultados mostraram que a produção de biogás na fase metanogênica manteve níveis relativamente mais elevados em temperaturas variando de 35 a 25 °C, e que o teor de metano da produção de biogás pode ser mantido acima de 50% em temperaturas acima de 25 °C. Os autores concluíram que temperaturas moderadas acima de 25 °C foram mais propícias à alta eficiência de produção de biogás.

2.3.1.3 Relação entre a Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A DBO se refere à quantidade de oxigênio que os organismos não fotossintéticos necessitam a 20°C para metabolizar os compostos orgânicos. As análises de DBO são realizadas cinco dias após o início da incubação, pois este é o tempo durante o qual a nitrificação, o processo pelo qual o nitrogênio orgânico e

amoniaco é convertido em nitratos e nitritos, consumindo oxigênio em uma forma não orgânica (o objetivo da análise de DBO), geralmente ocorre. Por outro lado, a DQO refere-se à quantidade de oxigênio necessária para a oxidação completa (por meios químicos e orgânicos) dos compostos orgânicos ao CO₂ e H₂O (Aguilera, 2017).

Scussel e Muniz, realizaram o dimensionamento de um sistema de obtenção e purificação de biogás a partir de dejetos de suínos, para uma granja com 250 animais, com reator de 2.005m de diâmetro e 6,00m de altura. Os autores controlaram os parâmetros de temperatura e mantiveram uma carga orgânica volátil de 3,35 kgDQO/m³.dia e uma concentração de DQO dissolvida de 36,26 kgDQO/m³. Seus resultados indicaram uma eficiência de remoção de DQO e DBO de 90,29% e 95,66%, respectivamente (Scussel, 2020).

2.3.1.4 Razão Carbono-Nitrogênio (C:N)

Conforme apontamentos de Gaio e Boroski (2020), os microrganismos metanogênicos requerem uma relação C:N adequada para realizar o processo de digestão anaeróbia, idealmente entre 20 e 30.

Em uma digestão com alta proporção de carbono (superior a 35:1), a produção de biogás é mais lenta e demorada devido ao desenvolvimento mais lento das bactérias. No caso oposto, onde há uma relação C:N menor ou igual a 8:1, cria-se um excesso de amônia e a atividade bacteriana é inibida (Barrena, 2022).

Zhang et al., experimentaram a produção de biogás a partir da codigestão de esterco caprino e diferentes substratos vegetais. Entre suas conclusões, encontraram que os processos mais eficientes foram dados por codigestões com relações C:N entre 21,19 e 35,61 (Zhang, 2013).

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Para a caracterização da biomassa, são estabelecidos os sólidos totais (ST), os sólidos voláteis (SV) e os sólidos fixos (SF). Estes parâmetros permitem determinar a quantidade de biomassa que um reator pode conter para manter seu funcionamento correto e otimizado. Um teste de Potencial Bioquímico Metanogênico (BMP), que mostra o potencial de produção de biogás de uma amostra de biomassa, também

pode ser realizado (Lins, 2017). A tabela 4, mostra a composição porcentual de ST e SV de de substratos de diferentes origens.

Os ST referem-se a toda matéria sólida, orgânica e inorgânica, encontrada em um material e remanescente após um processo de evaporação e secagem a aproximadamente 103 °C [33]. Quando a amostra é submetida a 500 °C ± 50 °C, a matéria orgânica é oxidada em um processo de combustão e apenas a fração de SF, referente às cinzas compostas de materiais inorgânicos, permanece. Os SV representam uma aproximação da quantidade de matéria orgânica. A partir disto, a norma VDI 4630 (2006), estipula que para determinar a quantidade ST, o substrato deve ser submetido a 105 °C até atingir massa constante e, para os SV a temperatura deve ser 550 °C, também até não ter variação de massa (UnADM, 2021).

Tabela 4. Teor de ST e SV de diferentes substratos.

SUBSTRATO	ST (%)	SV (%)
Dejeto de aves domésticas	35	65
Dejeto de boi	14	80
Dejeto de porco	13	85
Macrófita lemma	90	69
Macrófita wolffia	88	63

Fonte: Lins, 2017; UnAM, 2019.

2.5 TESTE DE POTENCIAL BIOQUÍMICO METANOGÊNICO (BMP)

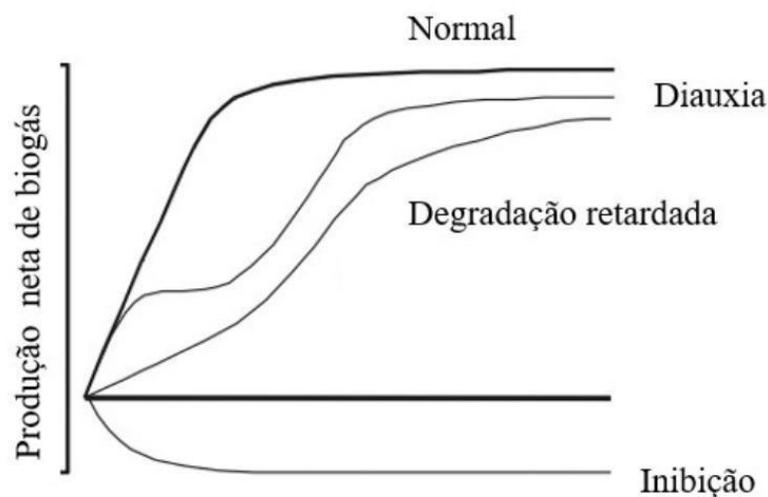
O teste de potencial metanogênico permite a medição da quantidade total de gás e de metano produzidos durante o processo de degradação da biomassa, sob condições controladas e constantes de temperatura e pressão, segundo parâmetros das normas VDI 4630 (Lins, 2017). Estas normas são desenvolvidas pela Associação Alemã de Engenheiros e são reconhecidas por muitas instituições de pesquisa. Eles

estabelecem as condições para a execução de testes cinéticos, de lote, contínuos ou semi-contínuos para a produção de biogás a partir de diferentes substratos orgânicos.

O processo de biodigestão pode ser avaliado pela sua produção diária de biogás, por determinado tempo, conforme observado na Figura 3. A partir dos perfis das curvas de quantidade de biogás produzido ao longo do tempo, a norma padrão VDI 4630 classifica os processos em quatro tipos:

- Normal: as substâncias são facilmente degradadas e a curva mostra um aumento constante na produção de biogás;
- Diauxia: a degradação ocorre em dois estágios, que, como mostrado na figura 4, a degradação começa, a produção é visivelmente reduzida e depois aumenta novamente;
- Degradação retardada: as substâncias presentes no reator são de difícil degradação. Normalmente ocorre com aquelas que contêm lignina ou lipídios, gerando um leve processo de inibição ou atraso na produção;
- Inibição: Representa uma produção de biogás menor que a do inóculo.

Figura 4. Curvas de produção de biogás.



Fonte: VDI, 2006.

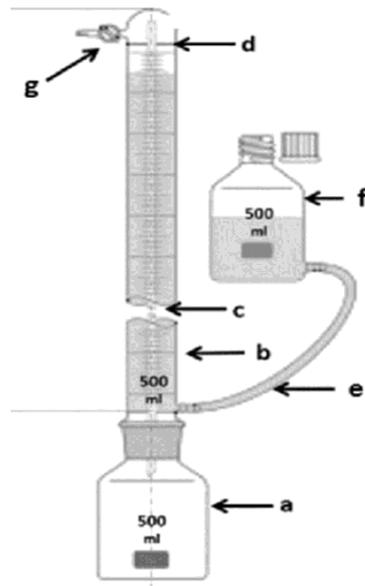
Um fator importante para o processo de digestão, e conseqüentemente para o teste de potencial metanogênico bioquímico, é a caracterização dos substratos, onde são medidos os sólidos totais. Conforme Rodrigues (2019), os sólidos totais (ST) são a matéria orgânica que permanece após a remoção da umidade, e seu cálculo é importante para evitar sobrecarga do reator, os sólidos fixos (SF) são materiais inorgânicos que permanecem sólidos após a calcinação e os sólidos voláteis (SV) são materiais orgânicos com potencial de biodigestão para obter biogás, portanto, quanto maior o teor de SV, maior o potencial para produção de biogás. A norma VDI 4630 estipula que o valor de ST no reator deve estar entre 7 – 10%. Raheman e Mondal (2012), testaram a digestão anaeróbia de 40 dias de retenção com semente de pinhão em diferentes teores de sólidos totais (TS), tendo como resultados que a produção de biogás aumentou quanto maior era o conteúdo de ST, com valores de até 20 %.

Para o tratamento do inóculo, a norma recomenda deixá-lo a uma temperatura de 27 °C por um período de sete a quinze dias antes de ser adicionado ao reator junto com os substratos e o teste começar.

2.5.1 Eudiômetro

O eudiômetro, como se apresenta na figura 5, é um tubo volumétrico, graduado de cima para baixo a partir do ponto 0. O tubo é colocado por uma junta de vidro esmerilhado sobre um recipiente de vidro volumétrico. O tubo de ligação passa através do fundo do eudiômetro e permite que o gás produzido fique atrapado no tubo de medição. Na parte inferior do eudiômetro, deve estar em um reservatório que permita o nivelamento do líquido para a medição do gás produzido (Briseño, 2017; De Souza, 2020).

Figura 5. Esquema de um eudiômetro.



Fonte: De Souza, 2020.

a - Frasco fator; b - tubo eudiômetro; c- tubo interno; d- Ponto 0;
e- mangueira; f- reservatório; g- torneira rosqueável.

Os reatores devem estar imersos em um banho que permita o controle da temperatura de reação. O líquido utilizado na medição não pode ser solúvel com biogás, sendo utilizada uma solução selante.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da presença do soro de leite na produção de biogás a partir da codigestão do dejetivo bovino com a macrófita *H. verticillata*.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os parâmetros físico-químicos dos substratos utilizados na codigestão: soro de leite, dejetivo bovino e *H. verticillata*;
- Estimar as proporções dos substratos a serem utilizados no reator, de acordo com a norma técnica VDI 4630;
- Avaliar a produção e composição do biogás a partir do processo de codigestão dado pelo dejetivo, soro e macrófita;
- Analisar a viabilidade do uso de soro e macrófita em processos de digestão e produção de biogás com dejetivo bovino.

4. METODOLOGIA

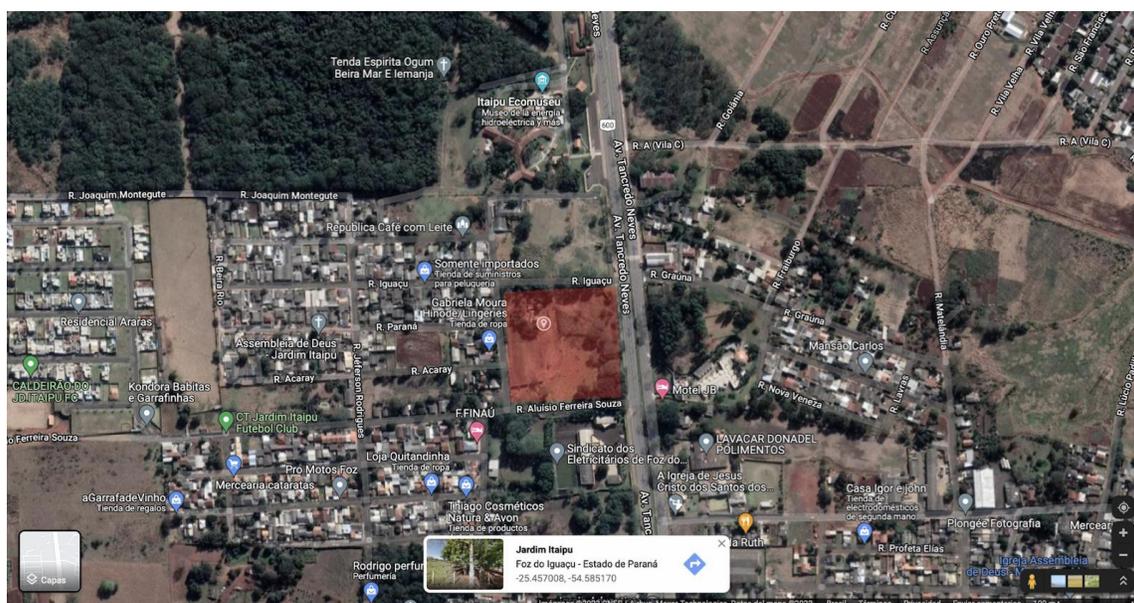
4.1 COLETA DE SUBSTRATOS

Os substratos coletados para o desenvolvimento deste trabalho foram obtidos na cidade de Foz do Iguaçu - Paraná.

As plantas de macrófitas foram fornecidas pela equipe da Itaipu Binacional Brasil, que as coletou ao longo da barragem da hidrelétrica. Uma vez coletadas, as plantas foram secadas ao sol e armazenadas em sacos de poliuretano, em um local seco, à temperatura ambiente e longe da luz.

O dejetos bovino e lactossoro foram coletados nas propriedades de pequenos produtores leiteiros na cidade de Foz de Iguaçu- Estado do Paraná, na entrada do jardim Venezia, (-25.450078, -54.585170) (Figura 6.).

Figura 6. Localização da propriedade de coleta de esterco e lactossoro.



Fonte: google maps, 2022.

O esterco foi armazenado em embalagens plásticas, previamente ambientadas com o próprio dejetos, sendo lavado três vezes com esterco, antes de colocar as amostras coletadas. As amostras foram armazenadas em freezer a aproximadamente -6 °C e até dois dias prévios ao seu uso.

O soro de leite foi obtido na mesma propriedade do dejetos, onde transformam o leite em queijo para consumo próprio, tendo como subproduto o lactosoro. Parte desse soro é utilizado como alimento para outros animais e parte é descartada. O pH deste substrato foi 7,6. O armazenamento foi feito em garrafa PET e mantido em refrigeração a temperatura de 5 °C, aproximadamente, até seu uso como substrato no reator.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS

A caracterização dos substratos foi realizada medindo seu conteúdo de ST, SV e SF, de acordo com a normativa VDI 4630, resumida nas tabelas 5 e 6. Uma amostra de substrato em massa úmida, é pesada em um cadinho (B) (previamente calcinado a 550 °C por uma hora) e pesada (C). O cadinho com o substrato é submetido a 105 °C até obter massa constante, e pesado, obtendo-se o valor da massa seca (A). Em seguida, o mesmo cadinho com A, é levado a 550 °C e pesado, para determinar o valor da amostra calcinada (D). A partir disso e com as equações da Tabela 6, são calculados os valores de ST, SV e SF. A Fotografia 2 mostra amostras no processo de caracterização, durante sua permanência na mufla e após dela, mostrando os SF.

Tabela 5. Condições para ensaios de ST, SF e SV.

VARIÁVEIS	TEMPERATURA	TEMPO DE ENSAIO
ST	105 °C	Até obtenção da massa constante
SV y SF	550 °C	Até obtenção da massa constante

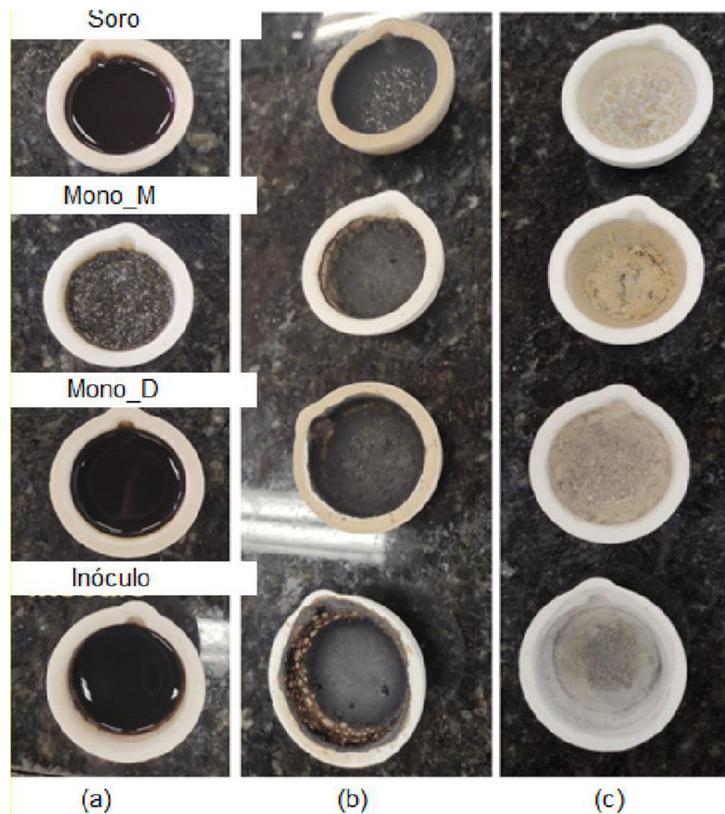
Fonte: APHA, 1999.

Tabela 6. Cálculo para caracterização dos substratos.

VARIÁVEIS	CÁLCULOS	EQUAÇÕES
ST	$ST (\%) = (A - B)/(C - D) \times 100\%$	<i>Ec. 1</i>
SF	$SF (\%) = (D - B)/(A - B) \times 100\%$	<i>Ec. 2</i>
SV	$SV (\%) = (A - D)/(A - B) \times 100\%$	<i>Ec. 3</i>

A: Massa da amostra seca (g); B: Massa do cadinho (g);
C: Massa da amostra úmida (g); D: Massa da amostra calcinada.

Fotografia 2. Amostras de monodigestão em (a) massa úmida, (b) secadas a 105 °C e (c) calcinadas a 550 °C.



Fonte: o autor, 2021.

Mediante uso e pHmetro, foi avaliada a acidez dos substratos. Os valores obtidos são apresentados na tabela 7.

Tabela 7. pH dos substratos.

Substrato	pH
Lactossoro	4,12
Macrófita	6,01
Dejeto	5,65
Inóculo	8,02
Monod. Defeito	7,21
Mond. Macrófita	8,15
Codigestao	8,02
Codigestao + Lactossoro	7,5

Fonte: o autor, 2022.

4.3 PREPARAÇÃO DO INÓCULO

Seguindo a recomendação da VDI 4630, foi utilizado inóculo, gentilmente cedido pelo Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás, proveniente da planta de tratamento de resíduos de restaurantes, localizada dentro da Itaipu Binacional. O inóculo foi aclimatado a uma temperatura de 37°C por um período de 15 dias antes de começar a abatelada (Fotografia 3).

Fotografia 3. Preparação do inóculo em banho Maria a 37°C.



Fonte: o autor, 2021.

4.4 TESTE DE POTENCIAL METANOGENÉTICO

Os testes de potencial bioquímico metanogênico (BMP) foram realizados de acordo com os parâmetros estipulados pela norma VDI 4630, considerando os resultados dos testes físico-químicos de caracterização das biomassas, do tratamento do inóculo, da temperatura de reação, da relação dos substratos e do tempo de teste.

As medidas de BMP foram feitas, em triplicata, com os afluentes Mono_D, Mono_M, Mono_S, Co_D_M, Co_D_M_S e com o inóculo, conforme composição apresentada na Tabela 5.

Foram realizadas as modigestões do dejetos bovino (Mono_D), da macrófita (Mono_M) e do soro (Soro). Foi realizada uma codigestão com o dejetos bovino e a macrófita em meio ao tampão (Co_D_M) e, posteriormente, outra codigestão com o dejetos bovino e a macrófita em meio ao soro e sem tampão (Co_D_M_S).

Os ensaios foram feitos em batelada e em temperatura mesofílica ($37,5 \pm 1,0$ °C) por até 40 dias.

A solução tampão utilizada nos efluentes foi preparada com bicarbonato de sodio em água com concentração 11g/L.

Os efluentes utilizados na mono ou codigestão foram preparados com teor de 10% de sólidos totais com base na massa seca. Os reatores foram carregados com 70 g de substrato, além do inóculo, solução tampão ou lactossoro.

Na codigestão, a razão entre o dejetos bovino e a macrófita foi de 2:1.

As quantidades dos substratos utilizados nos ensaios BMP foram calculadas de acordo com Albuquerque e Araujo (2016). As relações matemáticas para quantificação das massas úmidas do dejetos bovino, da macrófita, solução tampão e soro de leite estão dispostas na Tabela 8.

Tabela 8. Cálculo das massas úmidas dos componentes do reator.

Variáveis	Cálculos	Equações
Massa sólida (MS)	$MS = (k/W) \times 100\%$	Eq. 4
Massa sólida (MS)	$MS = MS_{dejetos} + MS_{macrófita}$	Eq. 5
Massa úmida (Mh)	$Mh = (MS/ST) \times 100\%$	Eq. 6
Solução tampão (A)	$A = W - Mh$	Eq. 7
Lactossoro (S)	$A = W - Mh$	Eq. 8
Inóculo (ml)	$ml = 2(MS \times SVs)/SVI$	Eq. 9

K: Porcentagem de sólidos totais a serem adicionados; W: Massa total a ser adicionada;

SVs: sólidos voláteis dos substratos; SVI: sólidos voláteis do inóculo.

Fonte: o autor, 2022.

A partir dos valores de SV (Tabela 9) da solução tampão, dos afluentes e do inóculo foram definidas as massas utilizadas nos reatores, para as mono e codigestões, conforme Tabela 10.

Tabela 9. Teor de sólidos voláteis dos substratos e afluentes.

Mistura	SV (%)
Mono_D	96,73 ± 0,01
Mono_M	84,39 ± 0,03
Soro	93,84 ± 0,04
Inóculo	62,58 ± 0,04
Co_D_M	95,62 ± 0,02
Co_D_M_S	77,20 ± 0,02

Fonte: o autor, 2022.

Tabela 10. Massa de substratos usados para testes de biodigestão.

Afluente	Dejeto bovino (g)	<i>H. verticillata</i> (g)	Solução tampão (g)	Lactosoro (g)	Inóculo (g)
Mono_D	42,481	-	27,519	-	216,399
Mono_M	-	7,703	62,297	-	188,783
Co_D_M	28,350	2,760	38,880	-	213,949
Co_D_M_S	28,350	2,760	-	38,880	213,949

Fonte: o autor, 2022.

Em cada reator, no início do ensaio de BMP foi adicionado gás nitrogênio, para eliminar o oxigênio dos frascos.

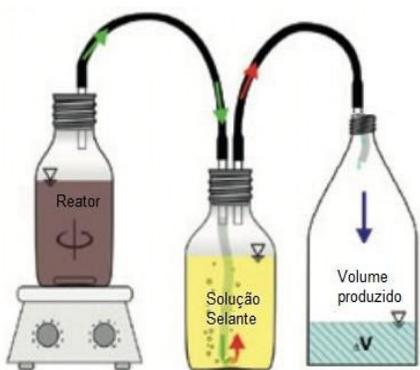
Foram realizadas leituras dos volumes de biogás produzido, nas segundas, quartas e sextas-feiras, durante o período da reação.

4.5 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental, reatores, segue a configuração feita por Rodrigues (2019). A montagem experimental consistiu em um sistema em com frascos de vidro que funcionam como reatores e que ficam dentro de um banho-maria a 37,5 °C. O biogás produzido é conduzido por uma mangueira até uma garrafa Mariotte, que contém a solução selante e recebe o gás em seu interior. À medida que o biogás entra no Mariotte, provoca o deslocamento do líquido, que é direcionado a uma proveta, onde volume alcançado é igual ao de gás produzido. A Figura 7 mostra o aparato experimental que foi desenvolvido.

A solução selante é composta por 30 mL de ácido sulfídrico (H_2SO_4), 87,64 g de sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4) diluídos em 1 L de água destilada (RODRIGUES, 2020).

Figura 7. Esquema do aparato experimental utilizado no teste de BMP.



Fonte: o autor, 2021.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os substratos foram caracterizados pelos ST, de acordo com a metodologia descrita na seção 4.2 e os valores obtidos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Teor de ST dos substratos.

Parâmetro	Dejeto	Macrófita	Lactossoro	Inóculo
ST (%)	16,48 ± 0,02	90,87 ± 0,02	4,27 ± 0,05	2,61 ± 0,02

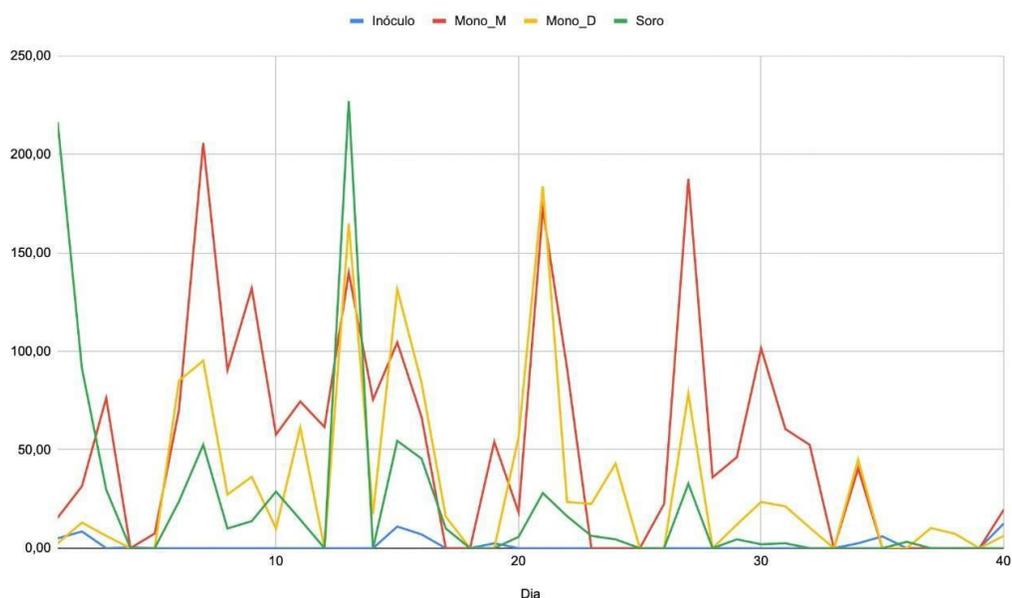
Fonte: o autor, 2022.

Os resultados mostram valores esperados para o ST e SF do dejeto bovino e da macrófita, de acordo com a bibliografia (RODRIGUES, 2019) e indicam que as biomassas utilizadas apresentam potencial para produção de biogás, inclusive o lactossoro, tendo em vista o alto teor de sólidos voláteis, conforme já indicado na Tabela 9.

Primeiramente foram avaliadas as monodigestões dos afluentes Mono_D, Mono_M e Mono_S, com relação ao BMP, conforme volumes de gás indicados na Figura 8. Observa-se que a amostra contendo apenas substrato de lactossoro (Mono_S) apresenta uma produção imediata de biogás, e que quase toda a produção é obtida nos primeiros 15 dias. Por outro lado, as amostras contendo como substrato apenas a macrófita (Mono_M) ou o dejeto bovino (Mono_D), mantêm uma produção em valores consideráveis por mais de 30 dias.

Para os afluentes das codigestões, Co_D_M e Co_D_M_S, onde os resultados dos volumes de biogás produzido são mostrados na Figura 9, têm-se produção ao longo dos 40 dias. Para estas amostras os resultados indicam que os maiores valores de produção acontecem até o dia 30 da biodigestão. O processo de digestão mais rápido foi apresentado na amostra Mono_S, que apresenta seus maiores picos de produção nos 15 primeiros dias. Por outra parte, a amostra Mono_M apresentou picos de produção até o dia 30, e seguidamente pode-se observar uma caída nos seus volumes de biogás gerados. Os maiores picos de são apresentados pela Co_M_D_S, seguido das Co_M_D e Mono_M.

Figura 8. Produção periódica de biogás nas amostra de monodigetão.

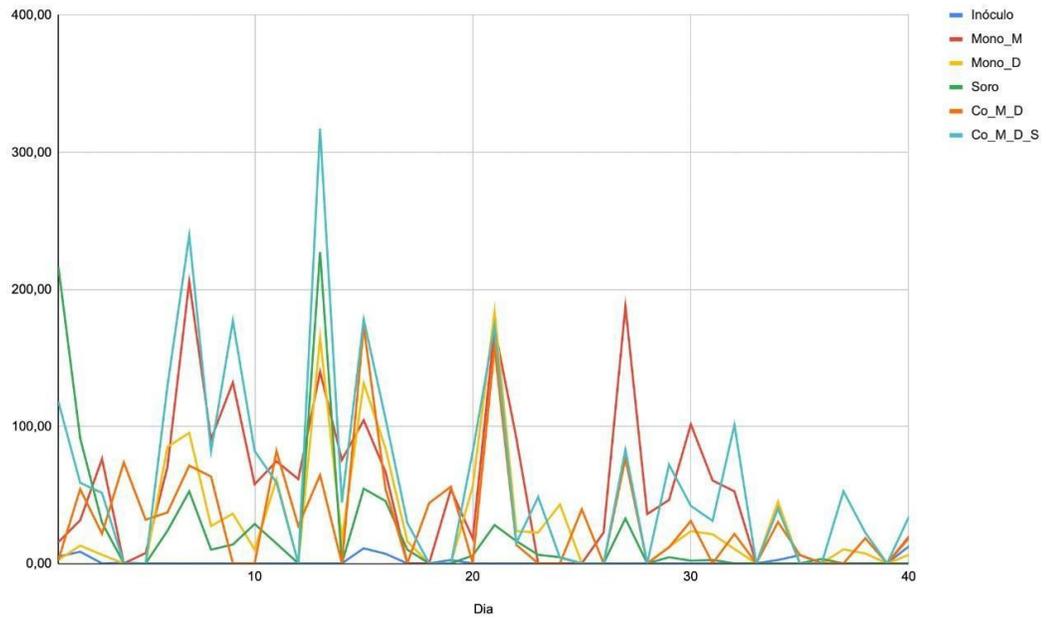


Fonte: o autor, 2022.

Passados os 30 dias da reação, a amostra de Co_D_M mantém um volume de produção próximo de zero, enquanto a Co_D_M_S chega a apresentar um pico de 100 mL de biogás, como pode se observar nas Figuras 8 e 9.

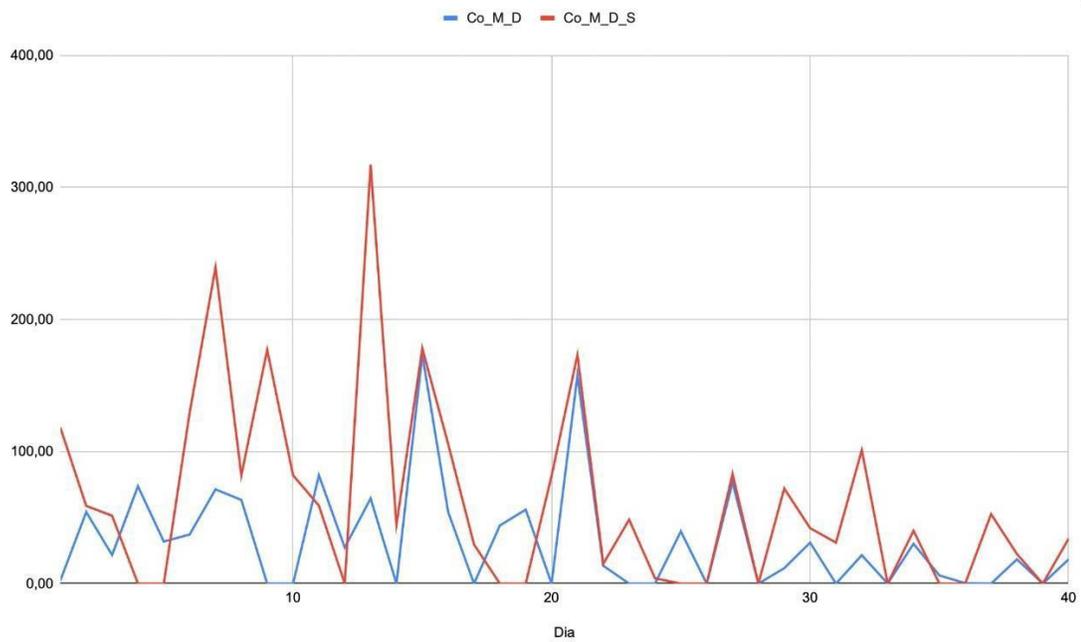
A Figura 10, mostra os volumes de gás produzidos nas codigestões dos afluentes Co_M_D e Co_M_D_S. Observa-se que os maiores picos de produção de ambas as codigestões acontecem entre os dias 15 e 25, sendo que a amostra Co_M_D_S produz volumes de biogás consideravelmente maiores que aqueles da Co_M_D. Fica evidente que a substituição da solução tampão pelo lactossoro favorece imensamente a biodigestão. Isto poder ser atribuído a presença das gorduras e dos carboidratos presentes no soro. Além da contribuição do lactossoro na produção do biogás, a sua utilização em lugar da solução tampão parece oferecer uma simplificação no processo de biodigestão já que esta solução, o tampão, não precisaria ser adicionado ao meio.

Figura 9. Volume produzido de biogás (mL) em mono e codigestões.



Fonte: o autor, 2022.

Figura 10. Produção periódica média de biogás para as amostras de codigestão (mL).



Fonte: o autor, 2022.

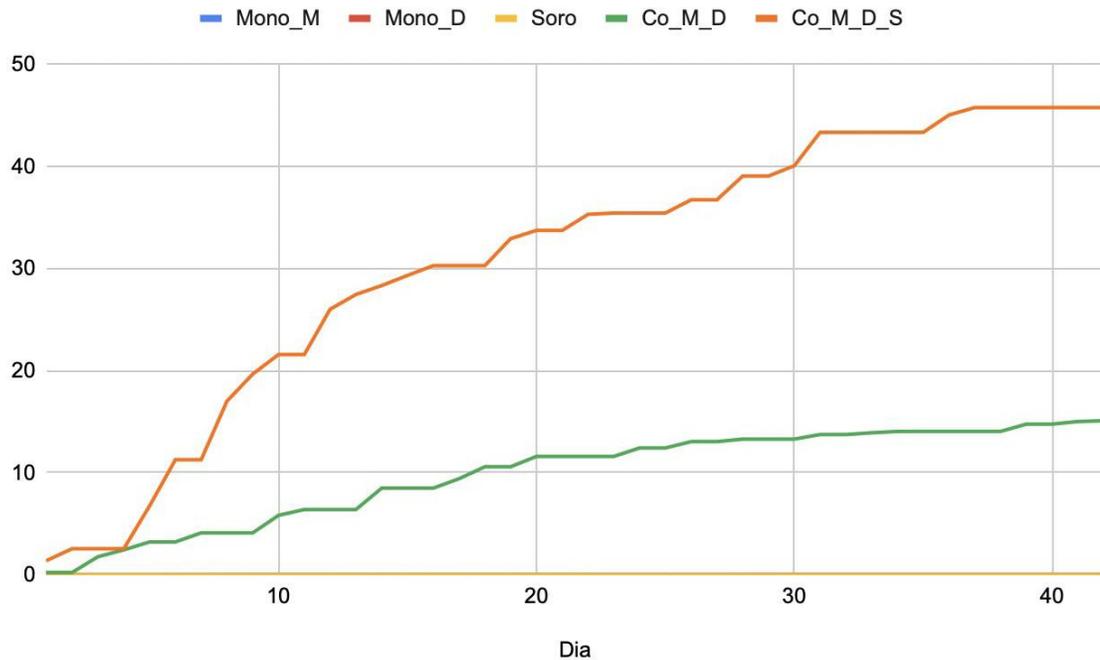
A produção acumulada de biogás obtida para as amostras de mono e codigestão, Mono_D, Mo_M, Mono_S, Co_D_M e Co_D_M_S e mostradas na Figura 11. A partir destes dados pode-se inferir que a produção de biogás em processos de codigestão com macrófitas e dejetos bovinos, em meio da solução tampão, apresenta bons resultados na produção de biogás, alcançando a produção de até 1250 mL de biogás.

Entretanto, é importante entender a razão pela qual a codigestão desses dois substratos se apresenta de forma semelhante ao processo monodigestivo dos dejetos bovinos. De acordo com os resultados apresentados por Rodrigues (2019), esta codigestão com substratos de dejetos bovinos e macrófita, apresentou resultados mais favoráveis do que a mesma codigestão neste trabalho. Uma hipótese seria a diferença no tipo de inóculo utilizado nos dois momentos, sendo aquele um inóculo proveniente de um biodigestor que trata dejetos suínos e o inóculo usados aqui foi proveniente de um biodigestor que trata, predominantemente, resíduos alimentares de restaurante. Isto sugere que aquele inóculo, proveniente dos resíduos suínos, poderia apresentar características mais favoráveis do que o proveniente de dejetos alimentares.

Ainda com relação a produção acumulada e de acordo com as curvas de classificação de produção de biogás mostradas na Figura 4, observa-se que os processos fermentativos podem ser classificados como normais, pois a produção de biogás permanece aproximadamente constante, para todos os afluentes estudados aqui. Observa-se também que, comparativamente, o soro apresenta um tempo de retenção de aproximadamente 25 dias, enquanto as demais amostras de monodigestão e codigestão mantiveram sua produção ao longo dos 40 dias de duração do BMP.

Ao analisar a produção acumulada quando a solução tampão (Co_D_M) é substituída pelo lactossoro (Co_D_M) na codigestão, o resultado parece ser bastante favorável, corroborando com a avaliação feita a partir das produções diárias, indicadas nas Figuras 8 e 9. A presença de lactossoro na codigestão do dejetos bovinos com a macrófita permite a produção de até 2,5 L de biogás enquanto aquela com solução padrão na codigestão dos mesmos substratos alcança a de 1,25 L.

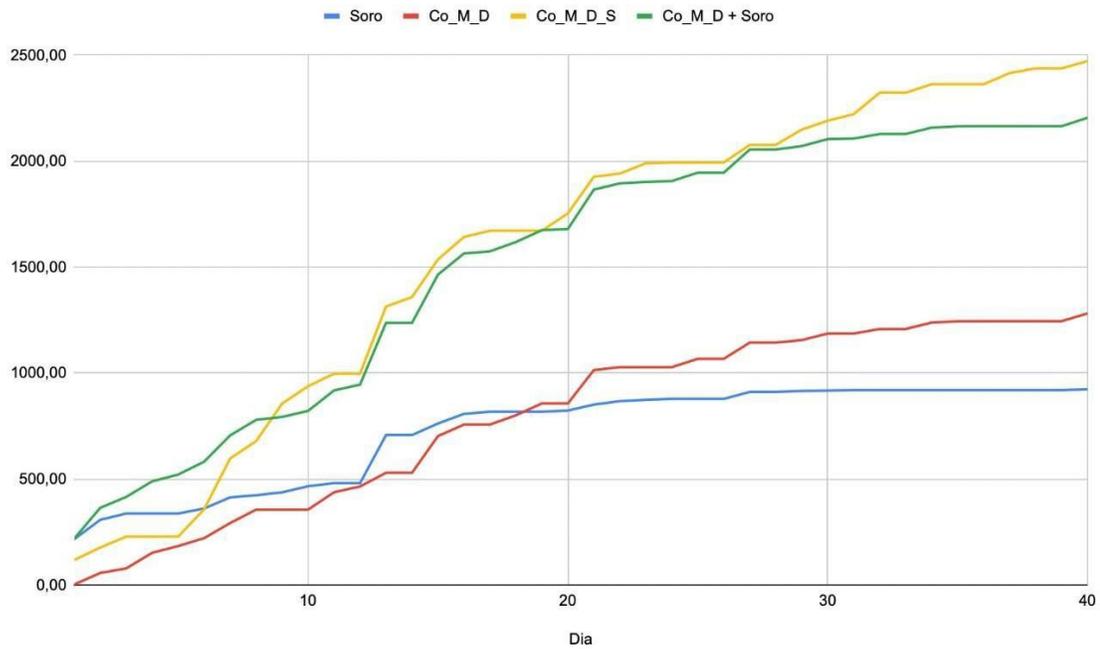
Figura 11. Produção média acumulada de biogás (mL/SV).



Fonte: o autor, 2022.

Um olhar mais acurado na produção de biogás a partir dos afluentes na codigestão contendo solução tampão (Co_D_M) ou naquela contendo lactossoro (Co_D_M_S), ou na monodigestão do afluente contendo lactossoro (Mono_S), pode ser feita a partir da Figura 12. Observa-se que a quantidade acumulada de gás produzida na codigestão contendo dejetos bovino e macrófita (Co_D_M), em meio de lactossoro, não corresponde, apenas, ao somatório das quantidades de gás produzidas na codigestão do dejetos com a macrófita em meio de tampão (Co_D_M) (1250 mL) mais a quantidade produzida na monodigestão do lactossoro (Mono_S) (900 mL), ou seja, $Co_D_M + Mono_S$ (2150 mL). A quantidade de gás produzida nessa codigestão contendo dejetos bovino e macrófita (Co_D_M), em meio de lactossoro, corresponde a valores superiores (2471 mL). Isto é um indicativo de que a presença destes substratos nesta codigestão tem um efeito sinérgico na reação, potencializando a produção do biogás.

Figura 12. Comparativo da produção média acumulada de biogás (mL) entre Soro, Co_M_De Co_M_D_S.



Fonte: o autor, 2022.

Ao avaliar os valores de biogás acumulado e considerando os de sólido voláteis, apresentados na Tabela 12, verifica-se que a codigestão do dejetto bovino e da macrófita, em meio de lactossoro (Co_D_M_S) apresentou a maior produção de biogás por grama de sólidos voláteis, 103 mL/g de SV. Esse resultado pode estar relacionado com a maior facilidade de decomposição, pela presença das gorduras e açúcares do lactossoro e, pelo efeito sinérgico das características microbiológica dos componentes da mistura. De forma contrária a monodigestão da macrófita (Mono_M) apresentou o rendimento mais baixo, < 1 mL/g de SV, que pode estar vinculado com a dificuldade no processo de digestão anaeróbica que apresentam os substratos vegetais, devido a presença de cadeias lignocelulósicas, e pela comunidade microbiana.

Tabela 12: Volume de biogás produzido nas mono e codigestões.

Afluentes	Volume produzido (mL)	mL/g de SV
Mono_D	1294	31
Mono_M	2112	< 1
Co_D_M	1281	43
Co_D_M_S	2471	103

Fonte: o autor, 2022.

Mais uma vez, quando se compara as produções de biogás das codigestões de macrófita e dejetos bovinos, um resultado positivo se apresenta na substituição do tampão pelo lactossoro. Neste caso, observa-se um incremento superior a duas vezes, no volume de biogás produzido por grama de sólidos voláteis.

Considerando que a acidez do meio é fator importante para o processo de biodigestão anaeróbia, o pH dos afluentes e efluentes foi avaliado. Adicionalmente, foram avaliados os valores de pH das misturas de substratos antes e depois do processo digestivo, os resultados mostram que não houve grandes variações de pH durante as reações, ficando entre 7,2 e 8,1 e indicando que as reações se mantiveram estáveis. Ainda, os valores expostos sugerem que o lactossoro cumpre a função de tampão no processo digestivo, mantendo estável a neutralidade do meio.

6. CONCLUSÕES

Foi obtido biogás a partir da codigestão anaeróbia do dejetos bovino com a *H. verticillata*, em meio de lactossoro e em condições mesofílicas, mostrando um incremento de mais de 100% no volume de biogás produzido por grama de sólidos voláteis.

A produção de biogás por digestão anaeróbia e utilizando lactossoro se apresenta como alternativa para seu aproveitamento como recurso energético, atribuindo valor agregado a este substrato.

A codigestão anaeróbia do dejetos bovino com a *H. verticillata*, em meio de lactossoro, se apresenta como uma alternativa sustentável no manejo desses resíduos.

O valor de biogás acumulado obtido a partir da codigestão anaeróbia do dejetos bovino com a *H. verticillata*, em meio de lactossoro, foi superior a aquele obtido na codigestão dos mesmos substratos, mas em meio de tampão.

No desenvolvimento deste trabalho, foi realizada a caracterização do teor de sólidos voláteis, fixos e totais da macrófita *H. verticillata*, esterco bovino, soro de leite e inóculo. Os valores encontrados foram consistentes com os esperados, de acordo com as bibliografias estudadas.

Tomando como referência os trabalhos anteriores desenvolvidos por Rodrigues (2020), o processo de codigestão com dejetos bovino e *H. verticillata* não teve o resultado esperado na produção de biogás, podendo ter sido o tipo de inóculo utilizado no processo, aquele obtido de um reator alimentado com resíduo de restaurante.

7. TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a composição do biogás produzido na codigestão do dejetos bovino e *H. verticillata*, em meio de lactossoro.

Identificar a composição elementar do inóculo a fim de verificar se aquele proveniente de resíduos restaurantes pode ter efeito no processo de codigestão do dejetos bovino com a *H. verticillata*.

8. REFERÊNCIAS

AGUILERA, Edwin Antonio Reyes. **Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos.** *Revista Científica de FAREM- Estelí*, n. 24, p. 60-81, 2017.

ALBUQUERQUE, Lais Schmidt; DE ARAUJO, Jesuína Cássia Santiago. **Produção de biogás por co-digestão utilizando uma mistura de dejetos bovinos e casca de café conilon.** *Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE*, p. 44-54, 2016.

APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater.** American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th Ed. Washington, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMNOLOGIA. Disponível em:
<[https://www.ablimno.org.br/boletins/pdf/bol_39\(1-3\).pdf](https://www.ablimno.org.br/boletins/pdf/bol_39(1-3).pdf)>. Acesso em: 05 jan. 2022.

BARRENA, Miguel et al. **Optimización de la producción de biogas a escala de laboratorio a partir de estiércol de bovino, lactosuero y totora (Scirpus californicus).** *Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza de Amazonas.* Disponível em:
<<http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDES/article/view/209>> Acesso em: 29 jan. 2022.

BRISENO, Angelica. **Producción de biogás a través de la codigestión de residuos sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de energía.** *CENTRO*, 2017.

BUSS, M. V. **Macrófitas aquáticas flutuantes: avaliação e indicativo do seu potencial bioenergético.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Biotecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Biotecnologia, Universidade do Oeste de Santa Catarina, Campus Videira – Unoesc, 2015. p.106.

CARMONA, Eleonora Cano et al. **Hidrólise enzimática de hemicelulose do pseudocaule de bananeira com endoxilânase I de *Aspergillus versicolor* para produção de xilooligossacarídeos e avaliação do seu efeito prebiótico.** *Red de Repositorios Latinoamericanos.* Disponível em:
<<http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2656019>> Acesso em: 23 Fev. 2022.

CARRANZA, Luis Antonio Chavez et al. **Contamination of Karstic Aquifers by Infiltration of Milk Serum**, Caseríos San Francisco, Florida and Vigaspampa, Celendín–Cajamarca 2021.

CERÓN-VIVAS, Alexandra et al. **Influência do pH e da relação C/N na produção de biogás de águas residuais**. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, n. 92, pág. 70 - 79, 2019.

DAE, revista. **Codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos**. *DAE*. Edição Especial. n. 208 | vol. 65 | outubro 2017,. Acesso em: 31 jan. 2022.

DENG, Zhichao et al. **Pré-tratamento com lacase da palha de trigo: efeitos das características físico-químicas e da cinética da hidrólise enzimática**. *Biotecnologia para biocombustíveis*, v. 12, n. 1, pág. 1-12, 2019.

DE SOUZA, Fernanda de Marco, et al. **Influência do inóculo na co-digestão anaeróbia de resíduos alimentares e grama**. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 2020, vol.11, no 1, p. 146-156.

DROSG, Bernardo. **Monitoramento de processos em usinas de biogás**. Paris, França: IEA **bioenergia**, 2013. Disponível em:
<<https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/process-monitoring-in-biogas-plants/>>.
Acesso em 12 dez. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Dairy Market Review**. *FAO*. 2021. Disponível em:
<<https://www.fao.org/3/cb4230en/cb4230en.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

GAIO, Julianaç Boroski, Marcela. **Parâmetros de monitoramento e condições para bom funcionamento de biodigestores**. Capítulo 3. In FURTADO, Andreia Cristina, et al. **Fundamentos de biodigestão, conceitos e processos**. 2020.

GETTYS, L. A.; ENLOE, S. F. **Hydrilla: Florida's Worst Submersed Weed**. *University of Florida – Institute of Food and Agricultural Sciences (UF/IFAS: Center for Aquatic and Invasive Plants)*. Gainesville, 2016. Disponível em:
<<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/ag404>>. Acesso em 12 dez. 2021.

GUERI et al. **Biomassa vegetal: Pré-tratamentos e codigestão anaeróbia**. Capítulo 5. In FURTADO, Andreia Cristina, et al. **Fundamentos de biodigestão, conceitos e processos**. 2020.

IBGE. PPM 020: **rebanho bovino cresce 1,5 % e chega a 218,2 milhões de cabeças**. IBGE. 2021. Disponível em:
<<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/31722-ppm-2020-rebanho-bovino-cresce-1-5-e-chega-a-218-2-milhoes-de-cabecas>>. Acesso em: 31 jan. 2022.

INVASIVE, ong. Plantas aquáticas. Disponível em:
<<https://www.invasive.org/alien/pubs/midatlantic/hyve.htm>>. Acesso em: 05 jan. 2022.

JAIN, Mayur Shirish; KALAMDHAD, Ajay S. **A review on management of Hydrilla verticillata and its utilization as potential nitrogen-rich biomass for compost or biogas production**. **Bioresource Technology Reports**, v. 1, p. 69-78, 2018.

JURADO, Alejandro Téllez, et al. **Enzimas lignocelulolíticas: producción, usos y perspectivas. panorama de la industria de celulosa y papel y materiales lignocelulósicos**. 2016, p. 64.

KUCZMAN, O; et al. **Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil**. **Jornal of clean production**. V. 196, p. 382-389, 7. 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.282>. Acesso em: 05 jan. 2022.

LINS, Leonardo Pereira et al. **Produção de biogás a partir de resíduos de bovinocultura leiteira por meio da codigestão com macrófitas da espécie Salvinia**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

OGEDA, Thais Lucy; PETRI, Denise FS. **Hidrólise enzimática de biomassa**. **Química nova**, 2010, vol. 33, p. 1549-1558.

NACIONES UNIDAS. **Una población en crecimiento**. **United Nations**. Disponível em:
<<https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>>. Acesso em: 29 jan. 2022.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION.; GODDARD INSTITUTE FOR SPACE STUDIES. **GISS Surface Temperature Analysis: Analysis Graphs and Plots**. p. 1, 2018.

ONUDI – Observatorio de Energias Renováveis para América Latina e o caribe. **O Biogás**. 1 ed. Programa de capacitações de energias renováveis, 2013.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura- FAO. **Manual de Biogás. FAO**. Disponível em:

< <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> >. Acesso em: 31 jan.2022.

PÉREZ-BRAVO et al. **Evaluación del potencial de generación de estiércol como materiapríma para la producción de biogás en la Zona Altamira, Tamaulipas**. Ecorfan. 2017.

Disponível em:

<https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol4num10/Rvista_de_Sistemas_Experimentales_V4_N10_5.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

PINOS-RODRÍGUEZ, Juan M. et al. **Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América**. *Agrociencia*, v. 46, n. 4, p. 359-370, 2012. Disponível em:

<<http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000400004>.

Acesso em: 10 jan. 2022.

POMPÊO, Marcelo. **Monitoramento e manejo de macrófitas aquáticas**. *Oecologia brasiliensis*, v. 12, n. 3, p. 5, 2008.. Disponível em:

<<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2882865>>. Acesso em: 05 jan. 2022.

TRISCARI, P., HENDERSON S., REINHOLD D. **Anaerobic digestion of dairy manure combined with duckweed (Lemnaceae)**. In 2009 **ASABE Annual International Meeting**, Reno, Nevada, USA.

RAHEMAN, Hifjur; MONDAL, Subhrajit. **Potencial de produção de biogás da torta de sementes de pinhão-manso**. *Biomassa e bioenergia*, v. 37, p. 25-30, 2012.

RAMIREZ ARENAS, Patricia Jaqueline. **Análisis de comunidades de bacterias y arqueas en tapetes microbianos hipersalinos, con énfasis en arqueas metanógenas metilotróficas dependientes de hidrógeno**. 2021. Dissertação de Mestrado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC.

RODRIGUES, Laryanne Naiara et al. **Produção de biocombustível a partir de plantatic invasora (hydrilla verillata)**. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, v. 7, n. 2, pág. 171-183, 2020.

RODRIGUÉZ, Lilia Cervantes. **La reutilización del lacto suero. Una forma de disminuir los impactos ambientales y obtener energía alternativa**. 2018. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/332554062_La_reutilizacion_del_lacto_suero_Una_forma_de_disminuir_los_impactos_ambientales_y_obtener_energia_alternativa>.
Acesso em: 05 jan. 2022.

ROSER, Max. **Crescimento populacional futuro**. *Our World in Data*. 2014. Disponível em:
<<https://ourworldindata.org/future-population-growth>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

SCUSSEL, Anelise Cristine; MUNIZ, Luis Antonio Rezende. **Dimensionamento de um sistema de obtenção e purificação de biogás a partir de dejetos suínos**. *Revista Eletrônica Científica Da UERGS*, v. 6, n. 1, p. 9-19, 2020.

SOUZA, W.T.Z. **Hydrilla verticillata (Hydrocharitaceae), uma invasora recente que ameaça ambientes de água doce do Brasil: uma revisão da extensão do problema**. 2011. Disponível em:
<<https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-011-0696-2>>. Acesso em: 12 dez. 2021.

THOMAZ, S.M.; BINI, L.M. **Ecologia e manejo de macróbias aquáticas**. Maringá: EDUEM, 2003. P. 261-338.

TOALA MOREIRA, Edwin Eyner. **Desenho de um biodigestor de polietileno para a obtenção de biogás a partir do estiercol de ganado no rancho Verónica**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso Disponível em:
<<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3406/1/236T0100.pdf>>.
Acesso em: 10 jan. 2022.

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA DE MEXICO – UnADM. **Diseño y funcionamiento de biorreactores específicos**. Ciudad de México, México. 2019. Disponível em: <<https://utp.ac.pa/documentos/2011/pdf/PCUTP-CIHH-LSA-211-2006.pdf>https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSBA/BLOQUE1/BI/06/BIB2/unidad_03/descargables/BIB2_U3_Contenido.pdf>. Acesso em 12 dez. 2021.

VALENCIA DENICIA, Elizabeth; RAMÍREZ CASTILLO, María L. **La industria de la leche y la contaminación del agua**. Redalyc Org. 2009. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/294/29411996004.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2022.

VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **Vergärung organischer stoffe - substratcharakterisierung, probenahme – stoffdatenaerhebung, gärvversuche**. German. 2006.

VERA-ROMERO. **Potencial de geração de biogás e energia elétrica parte i: excretas de ganado bovino e suíno potencial de geração de biogás e energia parte i: estrume bovino e suíno**. 2014. PP. 429-436. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S140577431470352X>>. Acesso em: 31 jan.2022.

WANG, Shiwei et al. **Influência da temperatura na eficiência de produção de biogás e comunidade microbiana em um sistema de digestão anaeróbica bifásica**. *Água*, v. 11, n. 1, pág. 133, 2019.

XAVIER, Leonardo Rafael Chaves Coelho. **Efeitos da urbanização sobre a composição e estrutura da comunidade de macrófitas aquáticas ao longo do rio capibaribe – Pernambuco – Brasil**. UFRPE. 2014. Disponível em: <http://www.pgb.ufrpe.br/sites/ww4.pgb.ufrpe.br/files/documentos/dissertacao_leonardo_xavier.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2022.

ZHANG, Tong et al. **Biogas production by co-digestion of goat manure with three crop residues**. *PloS one*, v. 8, n. 6, p. e66845, 2013.