

Biodigestor anaeróbico: produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos pecuários, purificação do biogás e implantação de cultivos de microalgas

Anaerobic biodigester: biogas and biofertilizer production from livestock waste, biogas purification and implementation of microalgae cultures

Biodigestor anaerobio: producción de biogás y biofertilizantes a partir de residuos ganaderos, purificación de biogás e implementación de cultivos de microalgas

Recebido: 20/12/2022 | Revisado: 03/01/2023 | Aceitado: 05/01/2023 | Publicado: 07/01/2023

Evandro Bernardo de Lira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-4747>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: Evandrolira@cear.ufpb.br

Marta Célia Dantas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5280-5316>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: marta.cds@cear.ufpb.br

Darlan Azevedo Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6147-9014>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: darlanazevedo@ct.ufpb.br

Cristiane F. Costa Sassi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4980-1779>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: cfcosta_ccosta@yahoo.com

Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1803-3527>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: riuzuani@cear.ufpb.br

Luís Celso Cardoso de Pina

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7123-1197>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: luiscelso91@hotmail.com

José Joaquim de Souza Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6840-7769>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: jose.neto45@professor.pb.gov.br

Resumo

As pesquisas com energias renováveis visam reduzir ou substituir os combustíveis fósseis, responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa. Outro problema ambiental, é o descarte inadequado de resíduos pecuários. Diante disso, o objetivo desta pesquisa é a produção de biogás utilizando esses resíduos, promovendo uma fonte de energia alternativa, além de gerar biofertilizante para produtores rurais. Foram desenvolvidos três biodigestores anaeróbicos; alimentados com esterco suíno (BS), avícola (BA), e uma mistura binária - com esterco suíno e de ave (BB). Determinou-se a produção e composição do biogás, parâmetros de temperatura, pH, sólidos totais, fixos e voláteis. O BS apresentou maior produção de biogás e metano com relação aos sólidos voláteis (SV) reduzidos do volume total, que foi de 804,8 L/kg SV de biogás e de 572,2 L/kg SV de metano. Seguido pelo BB com 626,0 L/kg SV de biogás e 457,6 L/kg SV de metano, e os menores valores para o BA com 522,8 L/kg SV de biogás e 259,4 L/kg SV de metano. Os meios sintetizados com os biofertilizantes foram eficientes nos cultivos das microalgas. A purificação do biogás no cultivo da *Chlorella sp.* apresentou remoção de $20,5 \pm 1,6$ a $53,8 \pm 3,3\%$ dependendo da concentração de CO₂ no biogás, aumentando o poder calorífico, além de aumentar a concentração de biomassa algal e do teor de PT, CT e LT no cultivo com relação ao ensaio controle. Evidenciando o grande potencial de geração de biogás pelos biodigestores utilizando os dejetos pecuários e produção de microalgas com os meios sintetizados.

Palavras-chave: Dejetos; Biodigestores; Microalgas; Energia renovável.

Abstract

Researches on renewable energies aims to reduce or replace fossil fuels, responsible for the emission of greenhouse gases. Another environmental problem is the improper disposal of livestock waste. Therefore, the objective of this

research is the production of biogas using these residues, promoting an alternative energy source, in addition to generating biofertilizer for rural producers. Three anaerobic digesters were developed; fed with pig manure (BS), poultry manure (BA), and a binary mixture - with pig and poultry manure (BB). Biogas production and composition, temperature parameters, pH, total, fixed and volatile solids were determined. The BS showed greater production of biogas and methane in relation to volatile solids (SV) reduced from the total volume, which was 804.8 L/kg SV of biogas and 572.2 L/kg SV of methane. Followed by BB with 626.0 L/kg SV of biogas and 457.6 L/kg SV of methane, and the lowest values for BA with 522.8 L/kg SV of biogas and 259.4 L/kg SV of methane. The media synthesized with biofertilizers were efficient in microalgae cultivation. The purification of biogas in the cultivation of *Chlorella* sp. presented removal from 20.5±1.6 to 53.8±3.3% depending on the concentration of CO₂ in the biogas, increasing the calorific value. in addition to increasing the concentration of algal biomass and the content of PT, CT and LT in the cultivation in relation to the control assay. Evidencing the great potential for biogas generation by biodigesters using livestock waste and microalgae production with the synthesized means.

Keywords: Waste; Biodigesters; Microalgae; Renewable energy.

Resumen

Las investigaciones en energías renovables tiene como objetivo reducir o sustituir los combustibles fósiles, responsables de la emisión de gases de efecto invernadero. Otro problema ambiental es la disposición inadecuada de los desechos del ganado. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es la producción de biogás a partir de estos residuos, promoviendo una fuente alternativa de energía, además de generar biofertilizante para productores rurales. Se desarrollaron tres digestores anaerobios; alimentados con estiércol de cerdo (BS), estiércol de ave (BA) y una mezcla binaria - con estiércol de cerdo y ave (BB). Se determinó la producción y composición del biogás, parámetros de temperatura, pH, sólidos totales, fijos y volátiles. El BS mostró mayor producción de biogás y metano en relación a los sólidos volátiles (SV) reducidos del volumen total, que fue de 804,8 L/kg SV de biogás y 572,2 L/kg SV de metano. Le sigue BB con 626,0 L/kg SV de biogás y 457,6 L/kg SV de metano, y los valores más bajos para BA con 522,8 L/kg SV de biogás y 259,4 L/kg SV de metano. Los medios sintetizados con biofertilizantes resultaron eficientes en el cultivo de microalgas. La purificación de biogás en el cultivo de *Chlorella* sp. presentó una remoción de 20,5±1,6 a 53,8±3,3% dependiendo de la concentración de CO₂ en el biogás, aumentando el poder calorífico. además de incrementar la concentración de biomasa algal y el contenido de PT, CT y LT en el cultivo en relación al ensayo control. Evidenciando el gran potencial de generación de biogás por medio de biodigestores a partir de desechos ganaderos y producción de microalgas con los medios sintetizados.

Palabras clave: Residuos; Biodigestores; Microalgas; Energía renovable.

1. Introdução

Os estudos voltados para a produção de energia limpa e sustentável vem aumentando devido ao fato que as principais fontes utilizadas são gás, carvão e petróleo, que apesar de serem abundantes não são renováveis. Essas fontes são as principais contribuintes para a emissão de gases geradores do efeito estufa e da poluição ambiental, uma vez que a queima desses combustíveis fósseis é responsável pela maior emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, mostrando que quanto maior o consumo de energia maior será o aumento das emissões de dióxido de carbono (Mele & Randazzo, 2019; Chen *et al.*, 2020; Pata, 2021).

Outro grande problema ambiental que vem se agravando devido a crescente produção de animais, como suínos e de aves, é o descarte de dejetos em corpos hídricos, estando relacionadas à poluição e eutrofização desses ambientes resultando em inúmeros malefícios, tanto para comunidades rurais como urbanas. Além disso, as produções de suínos e de aves acarretam também outro tipo de poluição, associada ao problema do odor desagradável dos dejetos devido à evaporação dos compostos voláteis que causam efeitos prejudiciais ao bem-estar humano e animal (Lucas *et al.*, 1999; Perdomo, 1999; Yuping *et al.*, 2021). Para manter a produção intensiva de suínos, é preciso encontrar formas eficazes de tratamento dos dejetos que reduzam os impactos ambientais (Oliveira, 1995). Mundialmente a água potável acessível para consumo é comprometida por causa da elevada contaminação por compostos químicos provenientes de efluentes municipais, industriais e agropecuários (Kriener, 2015; Mokarram *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a produção de biogás utilizando resíduos pecuários (esterco suíno e de frango) surge como uma das opções para a produção de energia renovável, limpa e de baixo custo, uma vez que a matéria-prima orgânica utilizada para sua produção é abundante e tem potencial energético elevado, de forma a complementar o abastecimento de energia do país. Sua

produção se dá em biodigestores anaeróbicos pelo processo de digestão anaeróbica, gerando além do biogás um biofertilizante que pode ser utilizado para diversas culturas alimentares. A digestão anaeróbica, é um método poderoso para minimizar os impactos ambientais negativos do manejo de dejetos em comparação com o manejo convencional de esterco, além de produzir energia (Hijazi *et al.*, 2016; Sobhi *et al.*, 2019; Gurmessa *et al.*, 2020). E o principal benefício dos biodigestores anaeróbicos é a produção de energia renovável na forma de metano, além de reduzir as emissões de gases do efeito estufa gerado pelos dejetos (Grando *et al.*, 2017; Guares *et al.*, 2021).

Os efluentes originários do biodigestor a partir de dejetos agropecuários, o biofertilizante, podem se mostrar eficazes no desenvolvimento de meios alternativos para culturas de microalgas, pois os mesmos são ricos em nitrogênio, fósforo e potássio (Yuping *et al.*, 2021). As microalgas são micro-organismos fotoautotróficos presentes em ambientes aquáticos que apresentam grande diversidade de formas, características e funções ecológicas e podem ser exploradas economicamente em diversos campos (Campos *et al.*, 2010; Kong *et al.*, 2021; Hussain *et al.*, 2021). Os cultivos de microalgas podem ser realizados pela utilização dos nutrientes contidos em diversos efluentes de águas residuárias, essas microalgas também apresentam elevada taxa de fixação de CO₂ de diferentes fontes, como gás de combustão (Mezzari *et al.*, 2013; Cheah *et al.*, 2015; Kuo *et al.*, 2015; Ahmed, 2022). Na alimentação, humana e animal, as microalgas representam uma fonte suplementar de proteínas, carboidratos, ácidos graxos, vitaminas, pigmentos naturais (como os carotenoides), entre outras substâncias capazes de enriquecer o valor nutricional dos alimentos e proporcionar efeitos benéficos à saúde como: melhoria da resposta imune, fertilidade e controle do peso (Spolaore *et al.*, 2006; Derner *et al.*, 2006).

Sendo assim, o objetivo desta pesquisa é a produção de biogás utilizando resíduos pecuários visando fornecer aos produtores rurais uma fonte de energia alternativa e renovável, acarretando na diminuição de gases do efeito estufa, de danos ambientais e melhorando as condições sanitárias, gerando biofertilizante para utilização agrícola, além de poder gerar uma fonte de suplementação para ração animal através de cultura de microalgas com a utilização do biofertilizante, podendo melhorar a qualidade da carne produzida.

2. Metodologia

2.1 Construção dos biodigestores anaeróbicos

O desenvolvimento dos protótipos de biodigestores anaeróbicos caseiros (Biosistema A) de baixo custo foi realizado no ambiente externo próximo ao Laboratório de Ambientes Recifais e Biotecnologia com Microalgas (LARBIM) no Centro de Ciências Exatas e da Natureza (CCEN-UFPB). Para a construção dos três protótipos de biodigestores utilizaram-se seis bombonas recicláveis, com capacidades para: 150 litros (duas); 200 litros (duas); 240 litros (duas), além de outros materiais de encanamento de água, de esgoto e de gás (Tabela 1).

Tabela 1 - Materiais utilizados para a construção dos biodigestores anaeróbicos caseiros.

Material	Especificações	Unidades	3 Biodigestores
Adaptador soldável	20 mm	1	3
Fita veda rosca	18 mm com 10 m	1	1
Espigão macho	20 mm - 1/8	6	6
Engate flexível	½ x 40 cm	2	2
Mangueira amarela	1/8	5 m	5 m
Tubo de PVC	32 mm	1 m	2 m
Tubo de PVC	20 mm	1 m	2 m
Registro de esfera	32 mm	1	3
Joelho de 90°	32 mm	3	3
Adaptador com flange	32 mm	1	3
Cola adesivo PVC	75 g	1	1
Bombona plástica	150 l	3	3
Bombona plástica	200 l	3	3
Bombona plástica	240 l	3	3
Garrafas de água	5 l	3	3
Registro de gás de Baixa pressão	3/8 NPT x 3/8 terminal	3	3

Fonte: Autores.

As bombonas foram adaptadas para funcionar como biodigestores anaeróbicos, apresentando: carga de entrada da matéria orgânica, por onde é feito o abastecimento do biodigestor (Figura 1A); câmara de fermentação ou biodigestão, onde é armazenada a matéria orgânica e ocorre a digestão anaeróbica (Figura 1B); gasômetro ou campânula, compartimento onde é armazenado o biogás (Figura 1C); e a carga de saída do efluente, biofertilizante (Figura 1D), configurando assim um biodigestor. Os biodigestores caseiros são adaptados do modelo indiano, uma vez que apresenta um gasômetro móvel, como mostrado na Figura 1.

Figura 1- Biodigestores caseiros adaptados do modelo indiano utilizados na pesquisa.



Fonte: Autores.

Os biodigestores apresentam dois recipientes (filtros) que servem para purificação do biogás, ambos ficam entre a câmara de fermentação e o gasômetro: um recipiente contém limalhas de ferro para a remoção do gás sulfídrico (Figura 2A), esse reage com o óxido de ferro formando o sulfeto. Sendo um sistema simples, eficiente e de fácil implantação servindo para

remoção total do gás sulfídrico presente no biogás (Anerousis & Whitman, 1985). E o segundo recipiente é um garrafão de água de cinco litros que contém quatro litros de água com uma solução de hidróxido de sódio com pH 14 (Figura 2B) que é utilizado para remover tanto CO₂ quanto outros gases. Dessa forma o biogás passa a ter um maior poder calorífico quando submetido a algum tratamento que elimine as impurezas e substâncias com características corrosivas, como o gás sulfídrico, a água e o CO₂ (Roratto, 2014).

Figura 2 - Imagens dos sistemas de purificação de biogás dos biodigestores.



Fonte: Autores.

2.2 Resíduos utilizados para abastecer os biodigestores

Os esterco utilizados para a realização desta pesquisa foram doados por um criadouro de porcos e por um abatedouro de aves. O criadouro de porcos está localizado no bairro do Cuiá, João Pessoa- PB, esses animais são alimentados com restos de vegetais coletados na CEASA (Central Estadual de Abastecimento, destinadas a melhor comercialização e distribuição de produtos hortifrutigranjeiros), tripas de galinhas e restos de comidas de restaurantes e residências. O abatedouro de aves está localizado no centro da cidade de Santa Rita-PB, o material de aves utilizado para a biodigestão é a cama de frango, ou seja, é um material composto principalmente por serragem, fezes, urina, penas e restos de ração que se misturam, formando um produto de origem animal (Pokrant *et al.*, 2021).

2.3 Produção de biogás e biofertilizante

Os três biodigestores foram abastecidos com esterco suíno (ES), esterco avícola (EA), além da mistura binária (ES e EA). Os biodigestores foram alimentados com um volume de aproximadamente 240 litros cada, da seguinte maneira: Biodigestor Suíno (BS) com 80 kg de ES e 160 litros de água (uma parte de dejetos e duas de água) –; Biodigestor Avícola (BA) com 60 kg EA e 180 litros de água (uma parte de dejetos e três de água) –, e Biodigestor Binário (BB) com 53 kg de ES e 106 L de água (70%), e 20 kg de EA e 60 L de água (30%). As diluições utilizadas para os esterco foram determinadas de acordo com o estabelecido por Lucas Junior *et al.* (2006).

A determinação do volume do biogás produzido por cada biodigestor foi realizada semanalmente mensurando o deslocamento vertical do gasômetro graduado e multiplicando por sua área da seção transversal interna (0,236 m²) durante o período de retenção hidráulica que variou entre os biodigestores. Em seguida os gasômetros eram esvaziados por um registro de controle de saída do biogás. Para maior precisão do volume do biogás produzido, foi feita a correção do volume de biogás para as condições de 1 atm. e 20 °C de acordo com a metodologia empregada por Matos *et al.* (2017). Dessa forma o biogás passa a apresentar comportamento próximo ao ideal devido ao fator de compressibilidade. Empregou-se a expressão resultante da combinação das leis de Boyle e Gay-Lussac, para corrigir o volume de biogás, pela equação:

$$(V_0P_0) / T_0 = (V_1P_1) / T_1 \quad (1)$$

Em que:

V₀ = volume de biogás corrigido, m³;

P₀ = pressão corrigida do biogás, 10,322,72 mm de H₂O;

T₀ = temperatura corrigida do biogás, 293,15 K;

V₁ = volume do gás no gasômetro;

P₁ = pressão do biogás no instante da leitura, 9.652,10 mm de H₂O;

T₁ = temperatura do biogás, em Kelvin, no instante da leitura.

Durante a produção de biogás os biodigestores tiveram suas temperaturas monitoradas por um equipamento chamado HOBO que mede temperatura e intensidade luminosa, e também foi monitorado o potencial hidrogeniônico dos biodigestores utilizando um medidor de pH portátil, porque esses parâmetros são significativos na produção de biogás, podendo interferir positivamente ou negativamente. As análises de sólidos totais, sólidos fixos e voláteis foram determinadas de acordo com os métodos padrões sugeridos pela Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1999).

A composição do biogás foi determinada de acordo com o kit portátil desenvolvido por Kunz e Sulzbach (2007), pesquisadores da EMBRAPA Suínos e Aves. Esse kit permite determinar a concentração dos principais gases do biogás, como os gases metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), sulfídrico (H₂S) e amônia (NH₃), de forma prática e eficiente. Permitindo assim, através do método analítico colorimétrico determinar as concentrações dos gases sulfídricos e amoníacos, e a concentração do CO₂ por análise volumétrica e a concentração de metano é determinada por diferença. E dessa forma monitorar a composição e a qualidade do biogás gerado. Realizou se também o teste de queima do biogás gerado pelos biodigestores, para comprovar de forma simples a predominância do gás metano e sua qualidade dependendo da coloração da queima e, portanto, a possibilidade de utilização do mesmo como gás combustível (Zhang *et al.*, 2021).

2.4 Cultivo das microalgas

Os biofertilizantes gerados pelos biodigestores com esterco suíno e avícola foram testados como meios alternativos em culturas de microalgas levando em considerações as características físico-químicas dos resíduos, para se ter conhecimento, principalmente das concentrações de NPK e outros compostos dos biofertilizantes utilizados. Os ensaios com os biofertilizantes foram feitos utilizando concentrações de 1% e 2% do volume total utilizado e com a suplementação de NPK para cultivar as microalgas, os meios sintetizados foram esterilizados em autoclave durante 30 minutos à 120°C. Além do meio químico (WC) como controle. Foram selecionadas três cepas de algas unicelulares ricas em proteínas, uma vez que o trabalho visa o enriquecimento de ração animal. Foram as cepas: D173WC *Monoraphidium contortum*, D375WC *Golenkinia radiata*, e D359WC *Chlorella sp.* (cepas do banco de cultura do LARBIM/CCEN/UFPB).

Os ensaios foram realizados em escala laboratorial, e em triplicata, para cada cepa utilizou-se 27 balões de 250 ml, sobre condições controladas de temperatura (25° ± 1° C) e fotoperíodo de 12 horas, com aeração constante (Compressor de ar eletromagnético Sunsun Aco-001 20L/min). Os crescimentos das culturas foram monitorados por fluorescência in vivo a cada 48 horas durante 12 dias, com aeração constante mantida por um Compressor Ar Aquário Boyu/jad Acq aco - 001 (25l/m). Nesse período observaram-se as seguintes fases de crescimento: a fase lag, que é uma fase de adaptação do microrganismo ao meio; a fase log ou exponencial, fase onde ocorre o crescimento/desenvolvimento significativo; e a fase estacionária, fase de estabilidade do crescimento, sendo a fase de colheita; e após essa fase temos a de decréscimo, ou seja, de morte dos microrganismos. A partir

dos resultados obtidos, foram feitos ensaios em escala maior para a obtenção de uma concentração maior de biomassa algal, que foi utilizada para determinar as concentrações de proteína, lipídeo e carboidrato.

2.5 Purificação do biogás em cultivo de microalgas

Parte do biogás produzido nos biodigestores caseiros nesta pesquisa foi submetido a um processo biológico de purificação visando aumentar o seu poder calorífico através da redução do conteúdo de CO₂, para isso utilizou-se o cultivo da microalga *Chlorella sp.*, que é uma espécie de microalga tolerante a elevadas concentrações de CO₂, e por ser uma microalga que cresceu no meio alternativo sintetizado com o biofertilizante de resíduo suíno também produzido nesta pesquisa.

O biogás gerado foi dessulfurizado, apresentando uma concentração mínima para poder ser adicionado ao cultivo das microalgas, o biogás foi injetado todos os dias até o término do cultivo. Foram realizadas análises volumétricas de CO₂ e CH₄ do biogás antes de serem injetados nas culturas e após passarem pela cultura para verificar se houve redução significativa do conteúdo de CO₂ e assim determinar o potencial de remoção de CO₂. Para isso, adicionou-se 60 L de biogás em 60 minutos (vazão de 1 L/min) no intervalo de 10 h às 12 h durante todo cultivo, o volume utilizado foi determinado pela produção de biogás dos biodigestores.

Para realizar os cultivos da microalga *Chlorella sp.* com adição de CO₂, utilizou-se quatro fotobiorreatores tubulares cilíndricos com capacidade útil de 15 L. Foram realizados quatro ensaios onde: o primeiro foi realizado utilizando meio WC aerado com ar ambiente (controle) para garantir a homogeneização do cultivo, e sem adição de biogás; o segundo com meio WC aerado com ar ambiente e com adição de biogás (no intervalo de 10:00 às 12:00, sem aeração no momento a não ser a do próprio biogás); o terceiro utilizou meio alternativo suíno e aerado com ar ambiente sem adição de biogás; e o quarto com meio alternativo suíno e com adição de biogás. Adicionou-se 60 L de biogás em 60 minutos (1 l/min – 0,066 vvm) diariamente no intervalo de 10 h às 12 h, nos cultivos com adição de biogás. Esses experimentos foram monitorados por fluorescência in vivo em espectrofotômetro, por contagem celular em microscópio óptico com câmara de contagem celular Fuchs-Rhosenthal e o peso seco da biomassa foi determinado pelo método gravimétrico, para determinar o crescimento celular, a velocidade de crescimento, e a quantidade de biomassa produzida. Foram realizadas também análises de proteínas (método de Lowry *et al.*, 1951, adaptado por Derner *et al.*, 2006), carboidratos (método de Kochert (1978), adaptado por Derner *et al.* (2006)) e lipídeos (método gravimétrico de Bligh & Dyer (1959)) para analisar se a utilização do meio alternativo e do biogás influenciou nas suas composições.

2.6 Análise estatística

Os resultados obtidos a partir das análises experimentais foram analisadas por meio de análise de variância (ANOVA), empregou-se o teste de Tukey $p \leq 0,05$ para determinar as diferenças significativas entre os dados encontrados. Utilizou-se o programa Software Statistica 7.

3. Resultados e discussão

3.1 Produção de biogás

A produção de biogás nos biodigestores desenvolvidos para esta pesquisa foi medida pelo deslocamento vertical do gasômetro graduado e multiplicando por sua área da seção transversal interna (0,236 m²) durante o período de retenção hidráulica que foi 35 dias para o BA, de 38 para o BS e de 56 dias para o BB. Esses tempos de retenções hidráulicas adotados foram determinados pela produção de biogás em cada biodigestor. O BS produziu mais biogás nas três primeiras semanas e nas seguintes, seu rendimento foi diminuindo, com o maior pico de produção na terceira semana de 1,13 m³. O BA apresentou uma maior produção na primeira semana de 0,36 m³, e nas seguintes o seu rendimento foi decrescente. E o BB apresentou uma

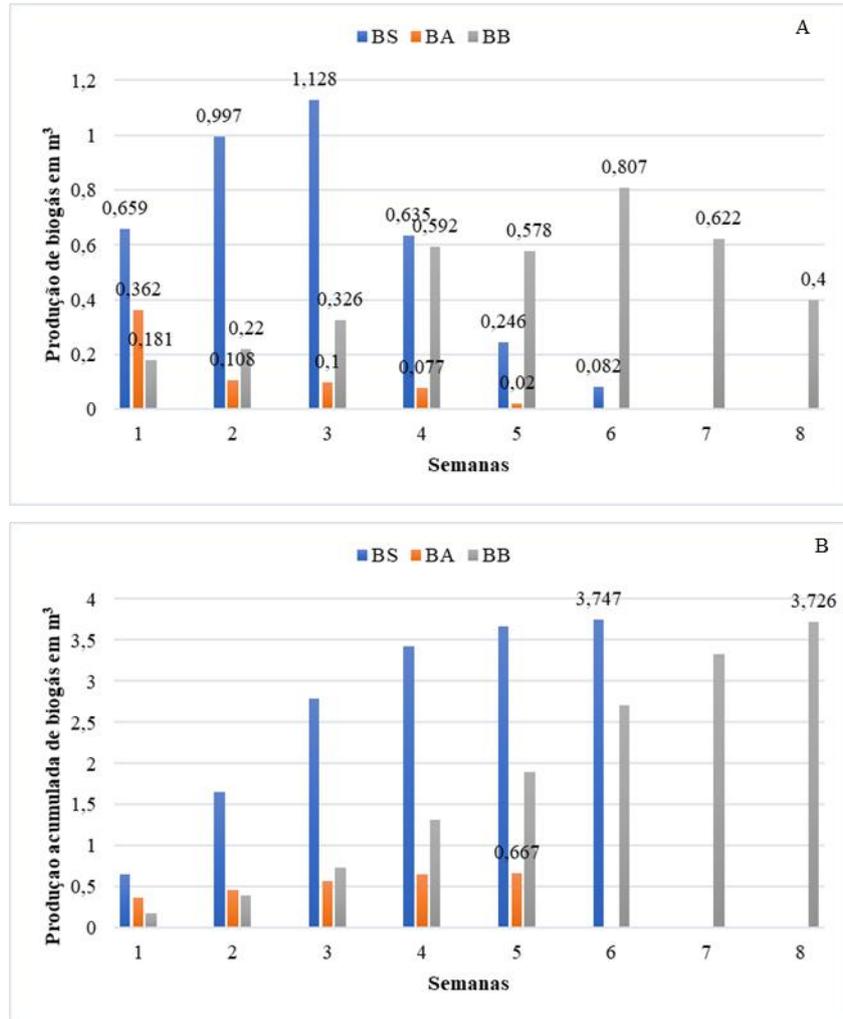
produção de biogás maior a partir da quarta semana, tendo uma maior produção de 0,81 m³ na sexta semana (Figura 3A). Na Figura 3B está representada a produção acumulada de biogás em m³ para os três biodigestores culminando na produção final de cada biodigestor, onde a maior concentração de biogás por m³ de substrato, foi gerada pelo BS de 3,747 m³ (correspondendo a 15,61 m³ de biogás por m³ de substrato), seguida pelo BB de 3,726 m³ (correspondendo a 15,52 m³ de biogás por m³ de substrato) e a menor produção foi para o BA com 0,667 m³ (correspondendo a 2,78 m³ de biogás por m³ de substrato). O BS com relação à produção geral de biogás apresentou uma média diária de 0,099 m³ para o período de 38 dias, o BA teve uma produção média de 0,019 m³ para o período de 35, já o BB obteve uma produção média de 0,067 m³ no período de 56 dias.

Zhou J. *et al.* (2016), em sua pesquisa com esterco diluído, relataram que a maior produção cumulativa de biogás foi de 16.607 mL em pH 7,0. Comparando a produção cumulativa de biogás obtida nesta pesquisa para o BS (esterco suíno diluído) de 3,747 m³ (utilizando 240 litros de substrato diluído) em ml com o volume de trabalho da pesquisa de Zhou J. *et al.*, (2016), que foi de 750 ml gerando 16.607 mL de biogás, foi obtido 11.709 ml em pH que variou de 7 a 7,5, mostrando que o valor do biogás alcançado está próximo do relatado, e comprovando que os valores de pH para a produção de biogás estão no intervalo de pH ideal.

Souza *et al.* (2005), ao trabalhar com esterco suíno utilizando um volume de carga orgânica de 10 L obteve uma produção acumulada de biogás de 115,48 L (0,1155 m³) por um período de 29 dias, que corresponde a 11,55 m³ de biogás por m³ de substrato. De acordo com esses dados pode ser observado que neste trabalho, os valores correspondentes de m³ de biogás por m³ de substrato para o BS e BB foram de 15,61 m³ e de 15,52 m³, respectivamente, sendo superiores ao valor equivalente dos autores.

Entretanto, Santos (2004), utilizando um biodigestor modelo indiano abastecido com volume de 2.290 L, relatou uma produção acumulada de biogás de 11,4 m³ de biogás em um período de 121 dias, resultando em produção de 4,98 m³ de biogás por m³ de substrato. Sendo um rendimento três vezes menor que o obtido nesta pesquisa tanto para o BS quanto para o BB. Esta diferença pode ter ocorrido devido a alguns fatores que interferem na produção de biogás como alimentação dos animais, composição química dos dejetos dos animais, tipo de biodigestor, temperatura, pH, dentre outros fatores. Porém, o principal fator que pode ter influenciado para essa baixa produção de biogás pode ter sido a falta da lâmina d'água no biodigestor utilizado, uma vez que parte da biomassa fica em contato com o ar, o que interfere negativamente na produção do biogás, além de parte do biogás produzido ser perdido por essa área que está em contato com o ar.

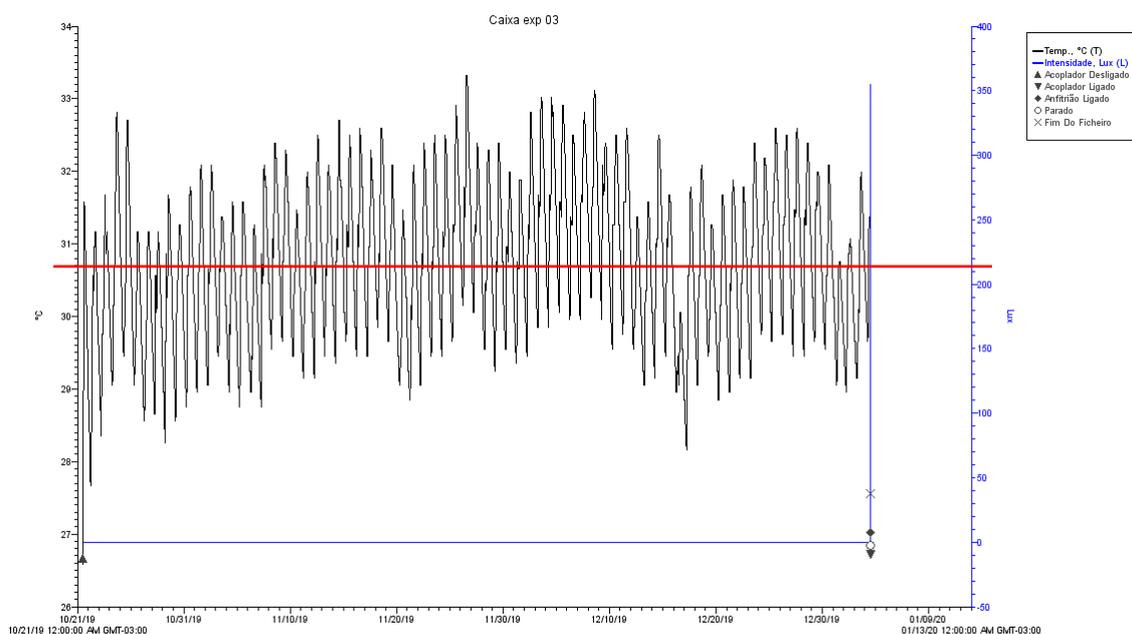
Figura 3 - (A) Produção semanal de biogás em m³ para os biodigestores com esterco suíno (BS), ave (BA), ave e suíno (BB), (B) Produção acumulada de biogás em m³ para os BS, BA, BB.



Fonte: Autores.

Os biodigestores apresentaram temperatura máxima de 33,33°C (durante o dia) e mínima de 26,59°C (durante a noite), com uma temperatura média de 30,76°C (Desvio Padrão de 1,003), sendo condições mesofílicas, ou seja, que varia de 20°C a 45°C, como demonstrado na Figura 4. Segundo Lucas Junior *et al.* (2006), a temperatura ideal para a produção de biogás em um biodigestor é em torno de 30°C e 35°C. E de acordo com Castro & Cortez (1998), em experimento desenvolvido em laboratório com a utilização de biodigestor rural, modelo indiano, chegaram a uma temperatura adequada para produção de biogás de 31°C. Temperaturas na faixa mesofílica (32°C e 35°C) são consideradas ideais para atingir uma produção de metano mais estável e contínua (Liu *et al.*, 2008). Cao *et al.* (2020), obtiveram maior rendimento de metano em condições mesofílicas (20 e 37°C), onde o rendimento cumulativo de CH₄ foi de 448,11 L / kg VS abastecido, 475,59 L / kg VS abastecido e 17,34 L / kg VS abastecido a 20 °C, 37 °C e 55 °C, respectivamente. Dessa forma a temperatura alcançada nesta pesquisa se mostrou adequada para a produção do biogás e metano.

Figura 4 - Variação da Temperatura interna dos biodigestores no período do experimento.



Fonte: Data logger HOBO.

Nos biodigestores também foram feitas análises do potencial hidrogeniônico (pH), indicado na Tabela 2, onde se observou que para os BS e BB o pH variou de 7 a 7,5 e de 7 a 8, respectivamente. E para o BA o pH variou de 6,8 a 6. O que pode justificar a baixa produção de biogás, por interferir no processo de digestão anaeróbica, assim como na concentração de metano em relação ao dióxido de carbono para o BA, por que as bactérias metanogênicas responsáveis pela produção de metano precisam estar entre um intervalo de pH de 6,8 a 7,4 (Mao *et al.*, 2015).

Zhou *et al.* (2016), estudando a produção de biogás com esterco suíno diluído relataram que a produção de biogás e o conteúdo de metano foram significativamente maiores em pH 7,0 (16.607 mL, 51,81%) do que em pH 6,0 (6.916 mL, 42,9%) e 8,0 (9.739 mL, 35,6%). O pH ótimo dos metanogênicos acetoclásticos, grupo de organismos responsáveis pela maior produção de metano, varia de 6,6 a 7,3 (Siegrist *et al.*, 2002; Ciotola *et al.*, 2014). A metanogênese acetoclástica é fortemente inibida abaixo de pH 6,2; E por outro lado, acima de pH 7,4 pode ser inibido por amônia livre (Siegrist *et al.*, 2002).

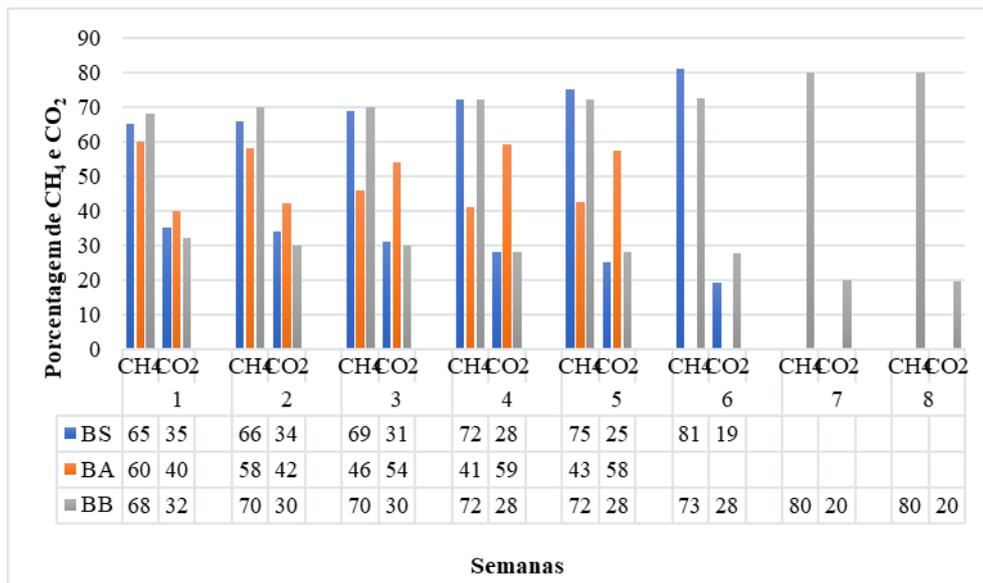
Tabela 2 - Valores do potencial de hidrogênio dos biodigestores durante o experimento.

Semana	Potencial hidrogeniônico (pH)							
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
BS	7	7,1	7,3	7,4	7,5	7,5	x	x
BA	6,8	6,4	6,4	6,2	6	x	x	x
BB	7	7,2	7,3	7,4	7,6	7,6	7,8	8

Fonte: Autores.

A composição do gás metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) para os três biodigestores estudados foram: o BS apresentou concentrações de CH₄ que variou de 65% a 81%, com uma maior concentração na última semana, e a concentração de dióxido de carbono variou de 35% a 19%; o BA apresentou concentrações de CH₄ que variou de 60% a 43%, com maiores concentrações apenas nas duas semanas iniciais, a concentração de CO₂ variou de 40% e 57%, a partir da terceira semana as concentrações de CO₂ foram maiores que as concentrações de CH₄; e o BB apresentou concentrações de CH₄ que variou de 68% a 80%, sendo superior às concentrações de CO₂, assim como o BS (Figura 5).

Figura 5 - Composição de metano e dióxido de carbono do biogás dos biodigestores.

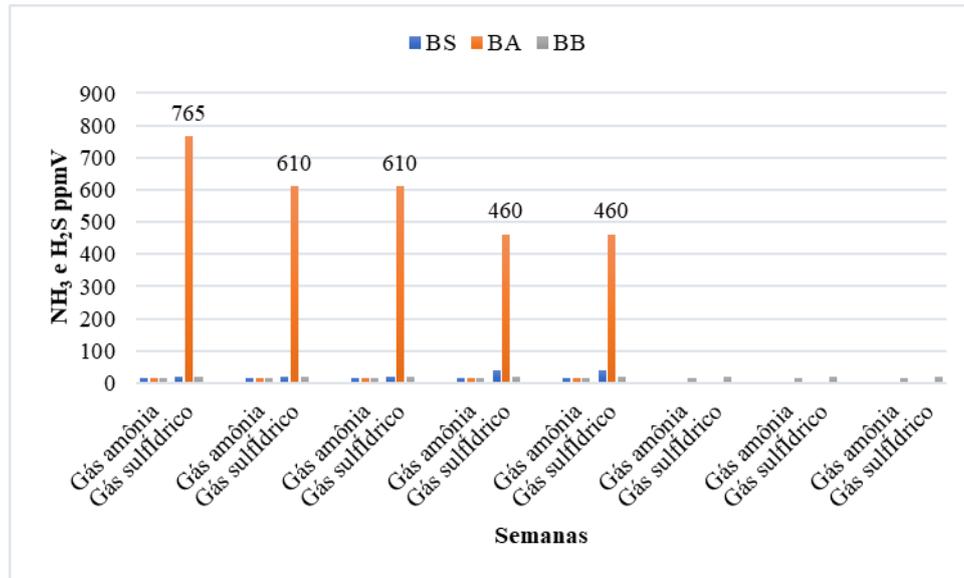


Fonte: Autores.

O maior conteúdo de metano assim como a maior produção de biogás foi obtido no BS e BB que apresentaram os maiores valores de pH, variando de 7 a 7,5 e de 7 a 8, respectivamente, mostrando que o pH influencia diretamente tanto na produção quanto na concentração de metano. Ali *et al.* (2019), relataram maior teor de CH₄ no biogás, 79%, em conjunto de reatores B com pH 8 e o valor mais baixo, 33%, em conjunto de reatores A em pH 3,5, nos outros valores de pH no conjunto de reatores A, o teor de CH₄ no biogás foi de 76%, 67%, 59%, 44%, 43% e 33%, em pH 7, 6, 5, 4,5, 4 e 3,5, respectivamente. Kumanowska *et al.* (2017), relataram índices de CH₄ de 73,5%, 71,6%, 66,9% e 57,8% nos valores de pH 6, 5,5, 5 e 4,5, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados no trabalho de Cao *et al.* (2020), que obtiveram uma maior produção de biogás e metano a partir de esterco suíno em temperatura mesofílica na faixa de pH 7,4 a 7,8, corroborando com os nossos resultados.

Nas análises de gás sulfídrico (antes da purificação) durante o TRH de cada biodigestor verificou-se que as maiores concentrações desse gás foram verificadas no BA, e essas maiores concentrações ocorreram nas primeiras semanas de digestão anaeróbica que foi de 765 e 610 ppmV (partes por milhão por volume), e para os biodigestores BS e BB as concentrações do gás se manteve constante com uma pequena elevação na quarta e quinta semana de 20 para 40 ppmV no BS. Já com relação à concentração do gás amônia observou-se que a concentração permaneceu constante (15 ppmV) para os três biodigestores no período de retenção hidráulica de cada (Figura 6). A produção de gás sulfídrico no biodigestor depende da quantidade de enxofre presente na matéria orgânica.

Figura 6 - Concentrações médias da produção do gás amônia e sulfídrico da digestão anaeróbica dos biodigestores.



Fonte: Autores.

As análises físicas de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis foram realizadas para os três tipos de substratos que foram utilizados para abastecer os biodigestores, antes de abastecer (afluente) e após o TRH (efluente), uma vez que tais análises permitiram avaliar as características biodegradáveis das amostras e as condições dessas para a geração de biogás e biometano (Pan *et al.*, 2021).

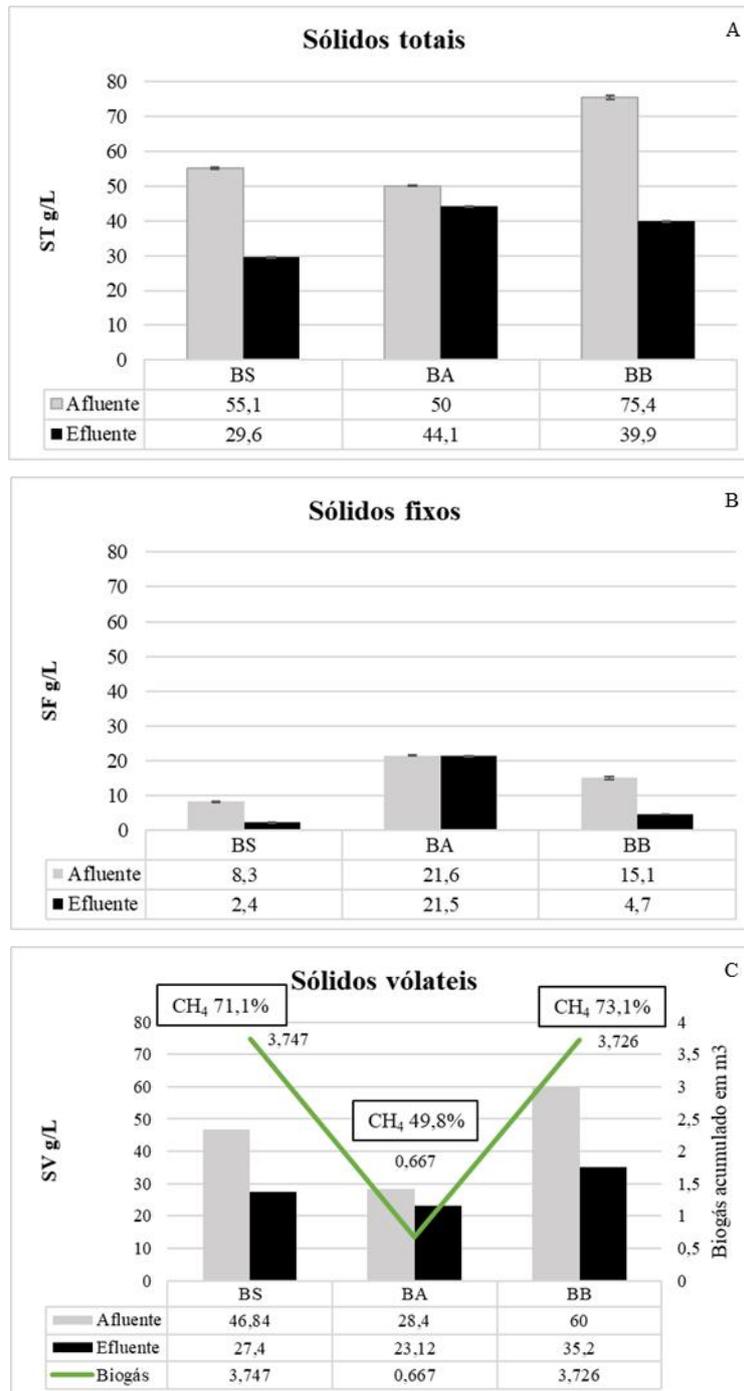
Os valores de sólidos totais (ST) para os afluentes e efluentes dos biodigestores estão representados na Figura 7A, onde pode-se observar que as maiores concentrações de sólidos totais nos afluentes foram para os biodigestores BB ($75,4 \pm 0,5$ g/L) e BS ($55,1 \pm 0,2$ g/L), e a menor para BA ($50,0 \pm 0,2$ g/L). Os maiores valores de ST foram para os afluentes que possuíam em sua composição esterco suíno, o BB e o BS, e o menor valor para o BA abastecido com cama de frango. E no final do experimento os efluentes dos biodigestores apresentaram uma menor carga de sólidos totais de $39,9 \pm 0,1$ g/L para BB, de $29,6 \pm 0,1$ g/L para o BS e de $44,1 \pm 0,1$ g/L para o BA, apresentando redução com relação ao volume dos afluentes indicando que o material sofreu biodegração, evidenciando uma taxa de remoção de ST de 47,1%, 46,3% e 11,8%, respectivamente. O BA apresentou a menor taxa de remoção de sólidos totais, ou seja, ocorrendo baixa biodegradação ocasionando uma menor produção de biogás quando comparado aos outros biodigestores que tiveram as maiores remoções seguidas das maiores produções de biogás.

Os valores de sólidos fixos presentes nos afluentes e efluentes estão representados na Figura 7B. A tendência é que os sólidos fixos do afluente se mostrem estáveis com relação ao efluente, podendo apresentar uma pequena variação uma vez que esses estão relacionados com a matéria inorgânica do substrato, e por terem sido submetidos apenas ao tratamento biológico. Portanto as alterações podem estar relacionadas a homogeneização dos substratos nos biodigestores no momento da obtenção do material para realização das análises, sendo difícil garantir 100% de homogeneização.

As análises de sólidos voláteis (SV) nos afluentes mostram que as maiores concentrações foram para o BB ($60,0 \pm 3,2$ g/L) e o BS ($46,8 \pm 0,1$ g/L), e a menor para o BA ($28,4 \pm 0,1$ g/L), correspondendo a 79,6%, 84,9% e 56,8% dos SV em porcentagem com relação aos sólidos totais, respectivamente. E os valores de SV dos efluentes foram $35,2 \pm 0,1$ g/L para o BB, $27,4 \pm 0,1$ g/L para o BS, e $23,1 \pm 0,1$ g/L para o BA, representando uma remoção de SV de 41,3%, 41,5% e 18,7%, respectivamente, como mostrado na figura 7C. As concentrações de sólidos voláteis representam a matéria orgânica biodegradável presente nos ST dos substratos, ou seja, o potencial para geração de biogás, que é diretamente proporcional a quantidade de matéria orgânica presente (Wilkie, 2003; Pan *et al.*, 2021). A partir dos dados de sólidos voláteis, juntamente com

a determinação do volume de biogás acumulado em m³ e sua composição de CH₄, pode-se realizar uma comparação entre a diminuição de sólidos voláteis e a produção de biogás e metano.

Figura 7 - (A) Quantidades de sólidos totais, (B) sólidos fixos para os afluentes e efluentes dos biodigestores, e (C) sólidos voláteis para o afluente e efluente e volume do biogás acumulado em m³ dos biodigestores. (apresenta diferença significativa entre as amostras com p < 0,05).



Fonte: Autores.

As maiores produções de biogás foram para os BS (3,747 m³) e BB (3,726 m³) correspondendo justamente aos biodigestores que apresentaram maior quantidade de SV nos seus substratos, e também as maiores remoções de SV. Confirmando que há uma relação direta da concentração de matéria orgânica biodegradável com a produção de biogás. Como relatado também

por Karim *et al.* (2005), em estudos sobre biogás onde perceberam que maiores concentrações de sólidos voláteis totais ocasionam maiores percentuais de metano. Konzen (2005), estudando os dejetos de suínos descobriu que existe grande potencial energético na produção de biogás, uma vez que mais de 70% dos seus ST são compostos de SV, componentes fundamentais da matéria orgânica para o processo de biodigestão anaeróbia, corroborando com os dados encontrados nesta pesquisa, que apresentou 84,9% de SV para o BS (100% de esterco suíno) e 79,6 de SV para o BB (70% de esterco suíno e 30% avícola).

O BS apresentou a maior produção de biogás e metano com relação aos SV reduzidos do volume total dos biodigestores, que foi de 804,8 L/kg SV de biogás e de 572,2 L/kg SV de metano. Seguido pelo BB com 626,0 L/kg SV de biogás e 457,6 L/kg SV de metano, e os menores valores foram observados no BA com 522,8 L/kg SV de biogás e 259,4 L/kg SV de metano (Tabela 3), devido a variação de pH entre 6 – 6,8, ficando a maior parte do experimento abaixo de 6,5. Como relatado por Zhou *et al.*, (2016), estudando a produção de biogás com esterco suíno em pH neutro (7), observou que a maior produção foi atingida em pH 7,0 de 0,4535 metano L/g SV (435,5L/kg SV), e o rendimento diminuiu em pH 6,0 e 8,0 para 0,1889 L/g SV de metano (188,9 L/kg SV), e 0,2659 L/g SV de metano (265,9 L/kg SV), respectivamente. Resultados que corroboram com os dados obtidos nesta pesquisa, onde os maiores valores da produção de metano foram obtidos em pH que variou de 7 a 8, o BS apresentou pH de 7 a 7,5 produzindo 572,2 L/kg SV de metano, e o BB com pH 7 a 8 que produziu 457,6 L/kg SV de metano. E a menor produção (260,4 L/kg SV de metano) foi para o BA que apresentou pH abaixo de 6,5.

Tabela 3 - Valores de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis em g/L, e porcentagem de sólidos voláteis totais e redução de sólidos voláteis totais.

	Biodigestor suíno	Biodigestor ave	Biodigestor binário
Afluente inicial			
	Média/DP	Média/DP	Média/DP
Sólidos totais	55,1 ± 0,2 ^C	50,0 ± 0,2 ^B	75,4 ± 0,5 ^A
Sólidos fixos	8,3 ± 0,1*	21,6 ± 0,1*	15,1 ± 2,8*
Sólidos voláteis	46,8 ± 0,1 ^B	28,4 ± 0,1 ^C	60,0 ± 3,2 ^A
Sólidos voláteis totais %	84,9%	56,8%	79,6%
Efluente final			
Sólidos totais	29,6 ± 0,1 ^B	44,1 ± 0,1 ^B	39,9 ± 0,1 ^A
Sólidos fixos	2,4 ± 0,1 ^C	21,5 ± 0,1 ^A	4,7 ± 0,0 ^B
Sólidos voláteis	27,4 ± 0,1 ^A	23,1 ± 0,1 ^B	35,2 ± 0,1 ^A
Redução de sólidos voláteis totais %	41,5%	18,7%	41,3%

Fonte: Autores.

Ye *et al.* (2013), pesquisando a melhoria na produção de biogás a partir da palha de arroz (RS) por co-digestão com resíduos de cozinha (KW) e esterco de porco (PM), relataram os maiores rendimentos de biogás e metano nos reatores com maior concentração de esterco suíno, reator B KW 0,4: PM 1,6: RS 1 - 53% de esterco suíno PM) produziu 674,4 L/kg de biogás e 383,9 L/kg de metano, o reator I (KW 0: PM 1: RS 0 - 100% de esterco suíno) 610,8 de biogás e 362,4 de metano L/kg, e o A (KW 0: PM 2: RS 1 - 66,6% de esterco suíno) gerou 609,8 de biogás e 350,3 de metano L/kg. Corroborando com os resultados obtidos neste estudo utilizando 100% de esterco suíno (BS) que foi de 804,8 L/kg SV de biogás e de 572,2 L/kg SV de metano e 70% de esterco suíno e 30% de ave (BB) com 626,0 L/kg SV de biogás e 457,6 L/kg SV de metano, onde foi observado resultados superiores e próximos aos relatados por Ye *et al.*, (2013).

Tápparo *et al.* (2021), determinaram as características da matéria-prima do esterco suíno, que passa por um sistema de tratamento de dejetos suínos que consiste em uma unidade de separação sólido-líquido (SLS), onde fraciona o esterco em sólido

retido na peneira (SRS), Lodo do tanque de sedimentação (STS), Lodo de biodigestor de lagoa coberta (CLBS) e Sobrenadante (SN), que apresentaram variação em todos os parâmetros, em particular na concentração do potencial bioquímico do biogás (BBP) e CH₄ em todas as coletas devido às mudanças temporais e sazonais (Tabela 1).

Apresentando um potencial médio de produção de biogás de 510±91 L/kg SV (54±10% de CH₄) para o SRS, de 327±66 L/kg SV (62±02% de CH₄) para StS, de 162±45 L/kg SV (59±14% de CH₄) para CLBS e 596±111 L/kg SV (57±10% de CH₄). Os resultados obtidos nesta pesquisa utilizando o esterco suíno sem fracionamento apresentou uma produção de biogás de 804,8 L/kg SV de biogás e de 572,2 L/kg SV de metano (71,1%).

A produção de biogás para o BS (com esterco suíno) foi de 3,747m³ utilizando 13,224 kg de sólidos totais, correspondendo a 283,4 m³/t ST, e para o BB foi de 3,726 m³ utilizando 18,096 kg de sólidos totais, equivalendo a 205,9 m³/t ST (com 70% esterco suíno e 30% ave). Meyer *et al.* (2018), determinaram o rendimento de biogás da digestão anaeróbia da excreta quantificado em sólidos totais, onde o esterco suíno produz em torno de 370 m³/t ST de biogás, o esterco de ave 400 m³/t ST e o de gado 240 m³/t ST. No entanto, os rendimentos reais de biogás da digestão anaeróbia de estrume irão variar dependendo de vários fatores: tempo de retenção na planta de biogás, composição da forragem e o tempo de armazenamento e gerenciamento do estrume antes de aplicá-lo para a produção de biogás. Dessa forma, observa-se que a produção de biogás de 283,4 m³/t ST para o BS nesta pesquisa foi próxima da determinada por Meyer *et al.* (2018).

3.2 Cultivo das microalgas

A microalga *Monoraphidium contortum* cultivada usando os biofertilizantes do BS (1 e 2% v/v) e BA (1 e 2% v/v), apresentou um tempo de cultivo de 11 dias, sendo determinado o fim do cultivo pelo início da fase estacionária, ou seja, que não apresenta crescimento significativo. Os ensaios apresentaram crescimento superior ao controle; A *Golenkinia radiata* cultivada com os meios sintetizados com os biofertilizantes dos BS (1 e 2% v/v) e BA (1 e 2% v/v), teve um tempo de cultivo de nove dias de acordo com o início da fase estacionária. Os ensaios utilizando os biofertilizantes do BS (1 e 2% v/v), BA (1% v/v) apresentaram crescimento inferior ao controle, mas o ensaio com BA (2% v/v) apresentou crescimento superior ao controle; e as culturas da *Chlorella sp.* utilizando os BA (1 e 2% v/v), não apresentaram crescimento significativo com relação ao controle, mas o BS (1 e 2% v/v) apresentaram crescimento superior ao controle, e o ensaio que apresentou melhor crescimento foi o BS (2% v/v). Os resultados da utilização dos meios sintetizados com os biofertilizantes gerados pelos biodigestores se mostraram bastantes eficientes para serem utilizados no cultivo das microalgas, pois esses efluentes possuem grandes quantidades de compostos químicos essenciais aos cultivos de microalgas como, nitrogênio, fósforo, potássio, cloreto, sódio, sulfato entre outros (Tabela 4).

Tabela 4- Características físico-químicas dos biofertilizantes dos biodigestores de ave e suíno.

Parâmetros	Resultados	
	Ave	Suíno
Sódio (Na ⁺), mg/L	633,5	652,8
Potássio (K ⁺), mg/L	0,0	23,9
Ferro Total, mg/L	1,72	0,75
Sulfato (SO ₄ ⁻), mg/L	379,4	3,4
Fósforo Total, mg/L	147,4	21,1
Cloreto (Cl), mg/L	340,8	852
Nitrato (N-NO ₃ ⁻), mg/L	10,94	4,23
Nitrito (N-NO ₂ ⁻), mg/L	1,146	0,118
Amônia (NH ₃), mg/L	654,04	301,64
Sílica (SiO ₂), mg/L	367,9	125

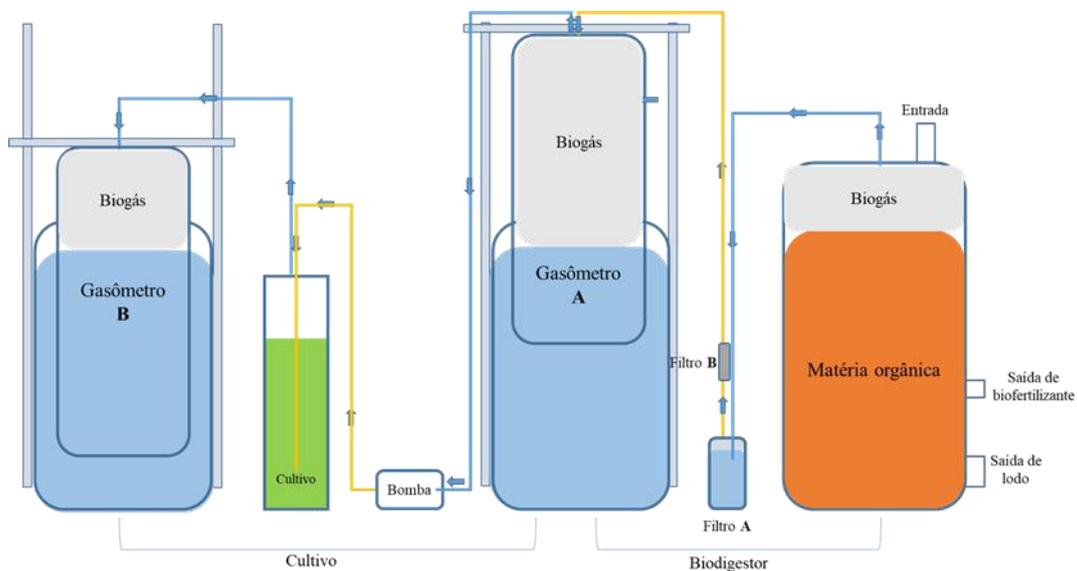
Fonte: Autores.

Vários autores estudaram o cultivo de microalgas em diversos resíduos/efluentes orgânicos como: Calixto *et al.* (2016), Choix *et al.* (2018) e De Carvalho *et al.* (2018), e relataram crescimento em alguns meios sintetizados com resíduos/efluentes orgânicos maiores que o ensaio controle. Mostrando que algumas microalgas podem ser cultivadas em larga escala em meios alternativos a base de efluentes orgânicos, pois esses reduzem o custo de produção por serem mais acessíveis, e por utilizarem uma pequena proporção de biofertilizante na formulação do mesmo, uma vez que a sua produção utilizando reagentes químicos (meio convencional) eleva bastante o custo de produção.

3.3 Purificação do biogás através de processo biológico e produção de biomassa microalgal

Visando aumentar o poder calorífico do biogás gerado pelos biodigestores anaeróbicos caseiros, utilizou-se para purificar o biogás cultivos de microrganismo como microalgas fotossintetizantes, uma vez que utilizam o CO₂ para o seu desenvolvimento celular, e dessa forma reduzir a quantidade de CO₂ presente no biogás produzido. Os cultivos de microalgas foram aerados constantemente com uma bomba centrífuga (compressor) para permitir a homogeneização dos microrganismos no cultivo garantindo uma melhor absorção da luz, de nutrientes e de CO₂. Foram adicionados no cultivo 60 L de biogás em um período de 60 minutos (1 L/min) durante todos os dias de cultivo, o biogás foi adicionado no cultivo no intervalo de 10:00 as 12:00 horas, que é onde ocorre a maior intensidade luminosa garantindo uma maior taxa fotossintética, e possivelmente uma maior absorção de CO₂. E para determinar a capacidade de remoção de CO₂ contida no biogás pelo cultivo de microalgas foram feitas análises de CO₂ do biogás antes de ser injetado no cultivo e pós-cultivo. A Figura 8, mostra um esquema simplificado de como foi montado o sistema de produção do biogás - biodigestor (biosistema A) e purificação do biogás em cultivo de microalgas – fotobiorreator (biosistema B).

Figura 8 - Fluxograma da integração dos biosistemas de produção e purificação do biogás no cultivo de microalgas.



Fonte: Autores.

A eficiência de absorção de CO₂ nos cultivos de microalgas em fotobiorreatores tubulares com capacidade para 15 L foi determinada por análise volumétrica dos gases CO₂ e CH₄ antes da adição do biogás na cultura e pós cultura. Essas análises foram realizadas a cada 48 horas durante todo o cultivo (15 dias com adição de 60 L de biogás em 60 minutos por dia, vazão de 1 L/minuto (1,0 vvm). A eficiência de remoção de CO₂ variou de 20,5±1,6, 32,4±2,0, 30,4±2,7, 35,5±0,9, 47,4±2,2, 46,2±1,6, 44,0±1,0 e 53,8±3,3%, de acordo com a concentração de CO₂ presente no biogás, que foram de 39±0,8, 35,5±0,5, 34,5±0,5, 31±0,8, 28,5±0,5, 26±0,5, 25±0,8 e 19,5±0,5% da composição do biogás, respectivamente. Observou-se que as eficiências de

remoções de CO₂ foram maiores para o biogás que apresentaram menor teor de CO₂, porém de forma geral a remoção de CO₂ da concentração total do biogás apresentou uma média de 11±1,3% (v/v) independente da concentração de CO₂ (podendo ser observado na Tabela 5), ou seja, se fosse adicionado 11% de CO₂ no cultivo da microalga *Chlorella sp.* (D349WC), todo o CO₂ seria consumido pela cultura. O aumento da concentração de CH₄ é diretamente proporcional a remoção de CO₂, aumentando o grau de pureza do biogás, e consequentemente o poder calorífico, como relatado por Kao *et al.* (2012), e pela ANP (Agência Nacional do Petróleo) na Portaria 128, de 28 de agosto de 2001, que a presença de CO₂ no biogás reduz o poder calorífico. Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam que o cultivo da microalga *Chlorella sp.* em fotobiorreator tubular tem a capacidade de purificar o biogás.

Kao *et al.* (2012), estudando a remoção de CO₂ em cultivos de *Chlorella sp.* com adição de biogás apresentando aproximadamente 69,4±0,9 % (v/v) de CH₄ e 20,3±1,1% (v/v) de CO₂, observou que as eficiências médias de captura de CO₂ pela *Chlorella sp.* MB-9 após aeração de biogás dessulfurado foram de 86,3 ± 1,9%, 80,3 ± 0,9%, 76,6 ± 1,4% e 73,7 ± 1,3% a uma taxa de fluxo de biogás de 0,05, 0,1, 0,2 e 0,3 vvm, respectivamente. A maior eficiência de captura de CO₂ foi no fluxo de biogás de 0,05 vvm do que na taxa de fluxo de gás de 0,3 vvm. Corroborando com os dados desta pesquisa, mostrando que há uma absorção eficiente do CO₂, observou-se uma remoção de CO₂ de 53,8±3,3% em um fluxo de biogás de 1,0 vvm, e evidenciando que para uma maior absorção de CO₂ pelas culturas de microalgas é necessária uma menor vazão do gás, aumentando dessa forma o tempo de retenção do biogás no cultivo.

Tabela 5 - Dados da concentração de metano e dióxido de carbono no biogás antes e depois de ser injetado nas culturas de microalgas, e a remoção e eficiência de remoção do CO₂. A análises de CO₂ e CH₄ antes e pós cultura apresentaram diferença significativa com P < 0,05.

Composição do biogás								
Dias	Volume	Antes			Depois			
		Tempo	Média CO ₂	Média CH ₄	Média CO ₂	Média CH ₄	Remoção de CO ₂	Eficiência de remoção CO ₂
1	60L	60min	39±0,8 ^a	61±0,8 ^f	31±1,2 ^a	69±1,2 ^e	8	20,5±1,6
3	60L	60min	35,5±0,5 ^b	64,5±0,5 ^e	24±0,5 ^b	76±0,5 ^d	11	32,4±2,0
5	60L	60min	34,5±0,5 ^b	65,5±0,5 ^e	24±1,2 ^b	76±1,2 ^d	10	30,4±2,7
7	60L	60min	31±0,8 ^c	69±0,8 ^d	20±0,5 ^c	80±0,5 ^c	11	35,5±0,9
9	60L	60min	28,5±0,5 ^d	71,5±0,5 ^c	15±0,8 ^d	85±0,8 ^b	13	47,4±2,2
11	60L	60min	26±0,5 ^e	74±0,5 ^b	14±0,5 ^d	86±0,5 ^b	11	46,2±1,6
13	60L	60min	25±0,8 ^e	75±0,8 ^b	14±0,5 ^d	86±0,5 ^b	11	44,0±1,0
15	60L	60min	19,5±0,5 ^f	80,5±0,5 ^a	9±0,8 ^e	91±0,8 ^a	10	53,8±3,3
Média geral de remoção de CO₂ do biogás 11±1,32								

Fonte: Autores.

O poder calorífico do biogás pode ser determinado através do teor de metano, o biogás com 60% de metano tem poder calorífico de 21.480 kJ m⁻³, dessa forma é possível determinar o aumento do poder calorífico do biogás purificado pelo método biológico, podendo comparar se os valores obtidos se aproximam do valor do metano puro que é de 35.800 kJ m⁻³ (Moran *et al.*, 2010). Os valores do poder calorífico analisado após o processo de captura de CO₂ variou de 24702 a 32578 kJ m⁻³, como pode ser observado na Tabela 6. O biogás injetado no 15º dia atingiu um poder calorífico de 32578 kJ m⁻³, que corresponde a um aumento de 49,2%, valor próximo ao determinado para o metano puro que é de 35800 kJ m⁻³, mostrando que o processo de purificação de CO₂ através de cultivo da *Chlorella sp.* é viável para aumentar a pureza do biogás, principalmente se o biogás

apresentar um teor de 10 a 20% de CO₂, podendo remover todo o CO₂ se a concentração for de 10%. Miyawaki *et al.* (2021), observaram um aumento médio de 50% no poder calorífico do biogás purificado por microalgas em todos os meios alternativos, aproximando-se também do valor puro do metano. Isso se deve ao fato que muitas microalgas, inclusive as do gênero *Chlorella* assimilam carbono inorgânico dissolvido (CO₂, HCO₃⁻ e CO₃²⁻) pela via metabólica C3, na qual o carbono inorgânico entra diretamente no ciclo de Calvin (Chen *et al.*, 2020). Vários pesquisadores (Kao *et al.*, 2012; Yan & Zheng, 2013; Hendroko *et al.*, 2011; Miyawaki *et al.*, 2021) também relataram que o cultivo de microalgas como, *Arthrospira sp.*, *Chlorella vulgaris* SAG 211-11b, *Chlorella sp.* MM-2, *Chlorella sp.* MB-9, *Chlorella vulgaris* ARC1, *Chlamydomonas sp.*, *Scenedesmus sp.* e *Tetradesmus obliquus*, para remoção de CO₂ de biogás se mostrou bastante promissor, além de ser uma alternativa econômica de purificação e ambientalmente sustentável.

Tabela 6 - Dados do poder calorífico com relação ao teor de metano antes e depois de passar pela cultura de microalgas.

Dias	Composição do Biogás				
	Antes		Depois		Aumento do poder calorífico %
	Média de CH ₄	Poder calorífico	Média de CH ₄	Poder calorífico	
1	61,0±0,8	21838	69,0±1,2	24702	13,1
3	64,5±0,5	23091	76,0±0,5	27208	24,6
5	65,5±0,5	23449	76,0±0,5	27208	24,6
7	69,0±0,8	24702	80,0±0,5	28640	31,1
9	71,5±0,5	25597	85,0±0,8	30430	39,3
11	74,0±0,5	26492	86,0±0,5	30788	41,0
13	75,0±0,8	26850	86,0±0,5	30788	41,0
15	80,5±0,5	28819	91,0±0,8	32578	49,2

Fonte: Autores.

3.4 Biogás no cultivo da *chlorella sp.*

O biogás utilizado nesta pesquisa foi gerado pelo processo de biodigestão anaeróbica realizado no biodigestor anaeróbico caseiro utilizando esterco suíno. Em seguida o biogás foi dessulfurizado (concentração inferior a 80 ppmV) e armazenado em gasômetros para então ser utilizado nos cultivos. Para a realização do experimento com a adição do biogás, foi determinada a concentração de CO₂ e CH₄ do biogás antes e depois de passar pelo cultivo, utilizando uma vazão de 1 L.min⁻¹.

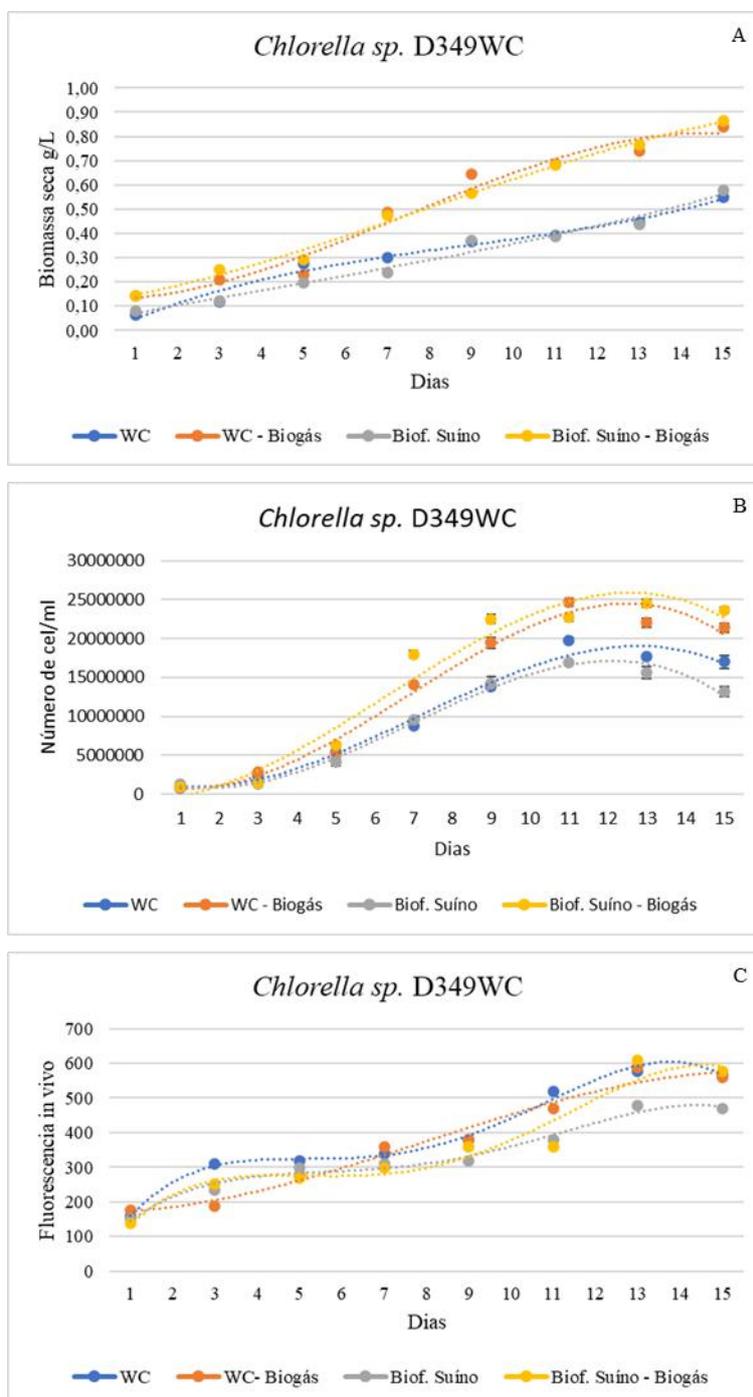
Os melhores resultados obtidos demonstram que os cultivos de microalgas com injeção de biogás apresentaram maior produção de biomassa, e um número maior de células por ml em comparação com os ensaios que só foram aerados com ar ambiente. Onde pode ser observado que o cultivo com meio alternativo com adição de biogás apresentou produção de biomassa, e um número maior de células/ml semelhante ao meio WC com adição de biogás. Observou-se que a fase Lag dos cultivos durou dois dias, é nessa fase que ocorre a aclimação das microalgas aos meios e as condições do ambiente, e a partir do 3º dia os cultivos já entraram na fase exponencial, fase de crescimento expressivo dos microrganismos (Figura 9), a suplementação com CO₂ proveniente do biogás se deu a partir do primeiro dia de cultivo.

O crescimento celular máximo alcançado nos cultivos aerados com biogás foram de 245,18 ± 5,6 x 10⁵ células/mL⁻¹ no 14º dia de cultivo no meio alternativo suíno, de 246,23 ± 5,2 x 10⁵ células/mL⁻¹ no 11º dia de cultivo no meio WC. Já os cultivos que foram aerados com ar ambiente apresentaram crescimento celular de 198,12 ± 3,7 x 10⁵ e 168,92 ± 1,9 x 10⁵ no 11º dia para o meio WC e meio alternativo suíno, respectivamente.

As maiores concentrações de biomassa em peso seco foram para os cultivos que tiveram adição do biogás, o cultivo com meio alternativo suíno com injeção de biogás apresentou a maior concentração de biomassa 0,87 ± 0,001 g.L⁻¹, seguido pelo cultivo com meio WC com injeção de biogás alcançado 0,84 ± 0,002 g.L⁻¹. Já os cultivos, com meio WC aerado com ar ambiente

(controle) obteve $0,55 \pm 0,001 \text{ g.L}^{-1}$ e com o meio alternativo suíno $0,58 \pm 0,001 \text{ g.L}^{-1}$, ou seja, podemos observar que ocorreu um aumento de 0,55 do meio WC sem injeção de biogás para $0,84 \text{ g.L}^{-1}$ no meio WC com adição de biogás, e para o meio alternativo aumento de 0,58 sem injeção de biogás para $0,87 \text{ g.L}^{-1}$ com adição de biogás (Tabela 7). A utilização de CO_2 como suplemento aumentou a quantidade de biomassa nos cultivos, mostrando que essa fonte de carbono é eficaz podendo melhorar significativamente o desenvolvimento das culturas de microalgas em fotobiorreatores. O carbono é um dos principais elementos na produção de biomassa microalgal, essa biomassa é composta por cerca de 50% de carbono, sendo obtido na maioria dos casos através do CO_2 , que é assimilado no processo de fotossíntese, responsável pela síntese de carboidrato, proteínas, vitaminas e lipídeos (Lourenço, 2006; Richmond, 2008; Mata *et al.*, 2010). Comparando os resultados com os meios que foram aerados somente com ar ambiente, nota-se que a adição do biogás como fonte extra de carbono interfere diretamente no crescimento da microalga de forma positiva. Os dados tanto do número celular quanto o da biomassa seca, mostraram que os cultivos que foram injetados biogás tiveram melhor desempenho. Chaudhary *et al.* (2018), pesquisando a biofixação do carbono usando a *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus obliquus* relataram maior concentração de biomassa nos cultivos com adição de CO_2 com relação aos ensaios com ar ambiente corroborando com os resultados deste estudo. Miyawaki *et al.* (2021), em seu trabalho utilizando a adição de CO_2 de biogás nos cultivos da microalga *Tetradismus obliquus* também obtiveram a maior concentração de biomassa para o meio alternativo a base de esterco suíno biodegradado e para o meio controle (CHU), corroborando com os dados desta pesquisa, evidenciando que a adição de CO_2 e a utilização de meio derivado da biodegração de dejetos suínos tem grande potencial para produção de biomassa microalgal. Jiang *et al.* (2011), utilizando meio de cultivo de efluente de esgoto sanitário somada a utilização de CO_2 observou um aumento de 0,71 para $2,23 \text{ g.L}^{-1}$ a produção da microalga *Nannochloropsis sp.* E Miyawaki (2014), trabalhando com meio suíno, meio de esgoto sanitário e meio bovino aerados com biogás, obteve uma maior concentração de biomassa (mix de microalgas) com relação aos meios sem adição de biogás. Esses dados confirmam os nossos, onde também notamos que a adição de biogás em culturas de microalgas aumenta o rendimento de forma eficiente.

Figura 9 - Curvas de crescimento celular do cultivo da microalga *Chlorella sp.* no meio WC aerado com ar ambiente e com adição de biogás, e no meio alternativo suíno aerado com ar ambiente e com biogás como fonte de carbono, por peso seco de biomassa (A), por número de células/ml (B) e por Fluorescência in vivo (C).



Fonte: Autores.

Os resultados do teor de proteína total (PT), carboidrato total (CT) e lipídeo total (LT) para a *Chlorella sp.* evidenciaram que os ensaios que foram submetidos a adição de CO₂ apresentaram um percentual mais elevado desses compostos, aumentando principalmente o valor de proteína e lipídeo na biomassa algal. O Ciclo de Calvin é a principal via metabólica responsável pela redução do carbono, por meio da fotossíntese fixa o CO₂ no ciclo de Calvin, produzindo ácidos graxos, carboidratos, aminoácidos e ácidos orgânicos (Richmond, 2008). O meio controle (WC) apresentou teor de PT de 36,09±2,04, CT de 24,30±1,65 e LT de 9,06±1,66, resultados menores que os encontrados nos ensaios com meio alternativo suíno e suplementação de biogás, onde o

melhor resultado foi alcançado utilizando o meio alternativo e a adição de CO₂, atingindo 42,79±1,01 de PT, 29±0,49 de CT e 17,06±0,34 de LT (Tabela 5). O teste ANOVA foi realizado para as amostras de biomassa seca em grama, PT, CT e LT apresentando diferença estatística significativa (p < 0,05).

Tabela 7 - Dados de crescimento, de produção de biomassa, e de teores de PT, CT e LT nos cultivos da *Chlorella sp.* em diferentes condições.

<i>Chlorella sp.</i> (D349WC)	Número Máximo de Células (Cel/ml ¹ x10 ⁵)	Duração da Fase Log. Dias (Exponencial)	Velocidade de Crescimento K	Rendimento em Biomassa seca (g)	Rendimento em Biomassa seca (g/L)	Produtividade da biomassa (mgL ⁻¹ Dia ⁻¹)	Proteína Total (%)	Carboidrato Total (%)	Lipídeo Total (%)
WC	198,12	3	0,933	8,3 ^b	0,55	38,8	36,09±2,04 ^c	24,30±1,65 ^c	9,06±1,66 ^c
WC com Biogás	246,23	3	0,989	12,6 ^a	0,84	59,0	40,59±1,05 ^b	28±0,93 ^a	14,04±0,54 ^b
Biof. Suíno	168,92	2	0,946	8,7 ^b	0,58	40,9	37,54±1,49 ^c	27,14±0,94 ^b	12,23±0,61 ^c
Biof. Suíno com Biogás	245,18	4	1,027	13,0 ^a	0,87	61,1	42,79±1,01 ^a	29±0,49 ^a	17,06±0,34 ^a

Fonte: Autores.

Jain *et al.* (2019), pesquisando a fixação de CO₂ e produção de biodiesel com a *Chlorella vulgaris* NIOCCV, observaram um aumento no teor de lipídios totais com o aumento da concentração de CO₂ de 5% para 10% de 28,5 ± 2,1% e 38 ± 2,8, respectivamente, enquanto o mesmo diminuiu para 18 ± 2,8% na concentração de CO₂ mais alta de 20%. Evidenciando que o teor baixo de lipídeo nos ensaios com a adição do biogás pode estar relacionado a elevada concentração de CO₂ no biogás. mas ainda apresentaram um valor maior com relação ao ensaio controle sem adição de biogás.

Tongprawhan *et al.* (2014), estudando a biocaptura de CO₂ por microalgas para melhorar o conteúdo de metano e de lipídeo, observou que as *Chlorella protothecoides*, *Chlorella sp.* e a *Chlorella sp.* marinha produziram 26,5±3,8^{aa}, 25,4±2,7^{aa} e 28,3±2,9^{aa} de lipídio total submetido a 50% de CO₂ e 50% CH₄, respectivamente, sendo a *Chlorella sp.* marinha a mais adequada para produzir lipídeos, Porém com relação aos ensaios controle ocorreu uma pequena elevação no teor de lipídio que foi de 22,9±4,3 para 26,5±3, para a *C. protothecoides*, de 25,8±2,3 para 25,4±2,7 para a *Chlorella sp.* e de 27,6±3,3 para 28,3±2,9 para a *Chlorella sp.* marinha. Isso evidencia que o teor de lipídio depende da cepa de microalga selecionada e que tem cepas que respondem positivo a adição de CO₂ para produzir mais lipídeos que outras.

Xie *et al.* (2018), trabalhando com a *Chlorella sorokiniana* também relataram uma diminuição no conteúdo lipídico com o aumento na concentração de CO₂ de 10 para 15 e 20, com um maior conteúdo de lipídio de 17,7% para 10% de CO₂. Obtiveram uma maior produção de biomassa na taxa de fluxo de gás de 6 sccm (0,006 vvm), e o maior conteúdo de lipídeo de aproximadamente 23% para a taxa de fluxo de gás de 10 e 20 sccm (0,01 e 0,02 vvm respectivamente).

Miyawaki *et al.* (2021), pesquisando a purificação de biogás em diferentes meios alternativos (esterco suíno, bovino e esgoto doméstico) utilizando a microalga *Tetrademus obliquus* alcançou uma maior produção lipídica de 26 ± 1,6 para o meio alternativo a base de esterco suíno com adição de biogás (37% de CO₂, fluxo de gás de 1 L/min), sendo maior que o conteúdo lipídico para os outros meios alternativos sem e com adição de biogás, e maior que o controle que teve 23 ± 0,3 de lipídio total.

Duarte *et al.* (2016), estudando a composição da biomassa de *Chlorella fusca* LEB 111 com adição de 10% de CO₂ (fluxo de gases de 0,05 vvm) submetidas a outros elementos como SO₂, NO e cinzas contabilizando cinco ensaios com relação ao controle obteve resultados semelhante em todos os experimentos com cerca de 19,7% (vv⁻¹) de carboidratos, 15,5% (vv⁻¹) de lipídios e 50,2% (vv⁻¹) de proteínas.

Choix *et al.* (2018), estudaram a produção de biomassa, a fixação de CO₂ (25%) do biogás e o acúmulo de compostos celulares por *Chlorella vulgaris* U162, *Chlorella sp.*, *Scenedesmus obliquus* U169 e *Scenedesmus sp.* usando vinhaça de tequila

(TVs) biodigeridas e filtradas como meios de culturas, foram avaliados e comparados com os meios de culturas convencionais de microalgas, C30, BG-11, Bold 3N e Bristol. A produção de biomassa de *Chlorella sp.* alimentado com ar foi maior quando cultivado em meio filtrado ($1,55 \pm 0,29 \text{ g L}^{-1}$) do que em TVs biodigeridas ($1,07 \pm 0,06 \text{ g L}^{-1}$), embora ambos os resíduos tenham induzido uma produção de biomassa maior do que os meios de cultura convencionais utilizados. No entanto, a produção de biomassa foi significativamente maior em ambos os resíduos, atingindo $1,75 \pm 0,35$ (TVs biodigeridas) e $2,30 \pm 0,27 \text{ g L}^{-1}$ (TVs filtradas) quando alimentados com biogás. Da mesma forma, a *C. vulgaris* U162 com fornecimento de ar apresentou uma produção de biomassa de $1,18 \pm 0,19$ (TVs biodigeridas) e $1,69 \pm 0,18 \text{ g L}^{-1}$ (TVs filtradas). Enquanto alimentado com biogás, a produção aumentou significativamente, $1,57 \pm 0,17$ e $2,22 \pm 0,26 \text{ g L}^{-1}$ em TVs biodigeridas e filtradas, respectivamente, sendo maiores em ambos os resíduos do que cultivadas em meios convencionais. A produção de biomassa por *Scenedesmus sp.* fornecido com ar e crescimento em TVs filtradas ($1,19 \pm 0,19 \text{ g L}^{-1}$) e biodigeridas ($1,10 \pm 0,13 \text{ g L}^{-1}$) foram maiores do que quando cultivadas em meios de culturas convencionais, e também aumentou significativamente quando fornecido com biogás registrando $1,45 \pm 0,16$ e $2,23 \pm 0,19 \text{ g L}^{-1}$ cultivado em TVs biodigeridas e filtradas, respectivamente. E o *S. obliquus* U169 fornecido com ar atingiu uma produção de biomassa de $1,06 \pm 0,13$ e $1,41 \pm 0,10 \text{ g L}^{-1}$ cultivadas em TVs biodigestadas e filtradas, respectivamente; fornecido com biogás, registrou $1,56 \pm 0,06$ e $1,84 \pm 0,07 \text{ g L}^{-1}$, respectivamente, obtendo uma produção maior do que nos meios convencionais. As quatro microalgas avaliadas alcançaram a maior produção de biomassa e taxa de fixação de CO_2 cultivadas em ambos os resíduos, acumulando principalmente carboidratos e proteínas.

Os resultados obtidos pelos autores, assim como os desta pesquisa, mostram que o cultivo de microalgas com adição de biogás rico em CO_2 aumenta não só a concentração de biomassa algal, mas também a concentração de compostos como proteína, carboidratos e lipídeos, que são de grande interesse das indústrias químicas, farmacêuticas, alimentícias e de biocombustíveis.

4. Conclusão

Os biodigestores desenvolvidos apresentaram excelente desempenho operacional, permitindo ao sistema atuar em condições mesofílicas de temperatura, ideais para a produção de biogás e biometano. Os BS e BB apresentaram maiores produção de biogás e metano, respectivamente. Os resíduos de suínos e aves tem grande potencial para produzir biogás, seja na sua utilização em monodigestão ou codigestão.

As três espécies de microalgas apresentaram crescimentos superiores utilizando meios alternativos sintetizados a partir dos efluentes dos biodigestores com relação aos ensaios com meios químicos convencionais (controles), por apresentarem em sua composição compostos como, nitrogênio, fosforo, potássio, cloreto, sulfato, sódio entre outros compostos, que são essenciais ao desenvolvimento de organismos fotossintetizantes.

A purificação do biogás foi realizada no cultivo da *Chlorella sp.*, apresentando uma maior eficiência de remoção de 53,8% de CO_2 quando adicionado o biogás com 19,5% de CO_2 , e apresentando uma média geral de remoção de CO_2 de 11%. Essa remoção de CO_2 eleva o poder calorífico para valores próximos do biogás purificado, possibilitando seu uso em outros setores energéticos. O uso do biogás no cultivo da microalga além de promover a purificação do biogás também resultou em maior produção de biomassa microalgal e seus percentuais de PT, CT e LT no meio alternativo e no meio alternativo com adição de biogás com relação ao meio controle com e sem adição de biogás. Mostrando o grande potencial dos meios alternativos e da adição de biogás para a produção de microalgas. Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram a possibilidade de implantação tanto do biossistema de produção de biogás como do biossistema de produção de biomassa microalgal, ou da integração dos biossistemas em propriedades rurais voltadas para a agricultura familiar.

Referências

ANP. (2001). Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Boletim mensal do biodiesel. (Portaria 128, de 28 de agosto de 2001).

- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Parisa, T. A., Islam, N.; Kusumo, F., Inayat, A., ... & Ong, H. C. (2022). Progresso e desafios da remoção de contaminantes de águas residuais usando biomassa de microalgas. *Chemosphere*, 286, 131656.
- Ali, S., Hua, B., Huang, J.J., Droste, R.L., Zhou, Q., Zhao, W., & Chen, L. (2019). Efeito de diferentes condições iniciais de baixo pH na produção, composição e deslocamento do biogás na população metanogênica acetoclástica. *Bioresource technology*, 289, 121579.
- Anerousis, J. P., & Whitman, S. K. (1985). Esponja de ferro: Ainda é uma ótima opção para adoçar gás azedo. *Oil Gas J.:(Estados Unidos)*, 83 (7).
- APHA. (1999). American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater.
- Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). Um método rápido de extração e purificação de lípidios totais. *Jornal canadense de bioquímica e fisiologia*, 37 (8), 911-917.
- Calixto, C. D., da Silva Santana, J. K., de Lira, E. B., Sassi, P. G. P., Rosenhaim, R., da Costa Sassi, C. F., ... & Sassi, R. (2016). Composições bioquímicas e perfis de ácidos graxos em quatro espécies de microalgas cultivadas em esgoto doméstico e resíduos agroindustriais. *Bioresource Technology*, 221, 438-446.
- Campos, V. B., Barbarino, E. & de Oliveiras Lourenço, S. (2010). Crescimento e composição química de dez espécies de microalgas marinhas em cultivos bateladas/Crescimento e composição química de dez espécies de microalgas marinhas em cultivos estanques. *Ciência Rural*, 40 (2), 339-348.
- Cao, L., Keener, H., Huang, Z., Liu, Y., Ruan, R., & Xu, F. (2020). Efeitos da temperatura e da razão de inoculação na produção de metano e na solubilidade de nutrientes da digestão anaeróbia de dejetos de suínos. *Tecnologia de biorecursos*, 299, 122552.
- Castro L. R., & Cortez L. A. B. (1998). Influência da temperatura no desempenho de biodigestores com esterco bovino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2, 97-102.
- Chaudhary, R., Dikshit, A. K. & Tong, Y. W. (2018). Carbon-dioxide biofixation and phycoremediation of municipal wastewater using *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus*. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(21), 20399-20406.
- Cheah, W. Y., Show, P. L., Chang, J.S., Ling, T. C. & Juan, J. C. (2015). Biosequestração de CO₂ atmosférico e CO₂ contendo gases de combustão por microalgas. *Bioresource technology*, 184, 190-201.
- Chen, Y., Xu, C. & Vaidyanathan, S. (2020). Influência do manejo do gás na conversão bioquímica de CO₂ por microalgas para produção de biocombustíveis. *Energia Aplicada*, 261, 114420.
- Choi, F. J., Ochoa-Becerra, M. A., Hsieh-Lo, M., Mondragón-Cortez, P., & Méndez-Acosta, H.O. (2018). Alta produção de biomassa e fixação de CO₂ do biogás pelas microalgas *Chlorella* e *Scenedesmus* usando vinhaça de tequila como meio de cultura. *Journal of Applied Phycology*, 30 (4), 2247-2258.
- Ciotola, R. J., Martin, J. F., Tamkin, A., Castan O. J. M., Rosenblum, J., Bisesi, M. S., & Lee, J. (2014). The influence of loading rate and variable temperatures on microbial communities in anaerobic digesters. *Energies*, 7(2), 785–803.
- De Carvalho, J. C., Borghetti, I. A., Cartas, L. C., Woiciechowski, A. L., Soccol, V. T., & Soccol, C. R. (2018). Integração da biorrefinaria da produção de microalgas na indústria de processamento de mandioca: Potencial e perspectivas. *Bioresource technology*, 247, 1165-1172.
- Derner, R. B., Ohse, S., Villela, M., Carvalho, S. M. D., & Fett, R. (2006). Microalgas, produtos e aplicações. *Ciência Rural*, 36, 1959-1967.
- Duarte, J. H., Fanka, L. S., & Costa, J. A. V. (2016). Utilização de gases de combustão simulados contendo CO₂, SO₂, NO e cinzas para o cultivo de *Chlorella fusca*. *Bioresource technology*, 214, 159-165.
- Grando, R. L., Antune, A. M., De, S., Fonseca, F. V., Sánchez, A., Barrena, R., & Font, X. (2017). Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: a European evaluation of research and development. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 80, 44-53.
- Guares, S. A., De Lima, J. D., & Oliveira, G. A. (2021). Techno-economic model to appraise the use of cattle manure in biodigesters in the generation of electrical energy and biofertilizer. *Biomass and Bioenergy*, 150, 106107.
- Gurmessa, B., Pedretti, E. F., Cocco, S., Cardelli, V., & Corti, G. (2020). Manure anaerobic digestion effects and the role of pre- and post-treatments on veterinary antibiotics and antibiotic resistance genes removal efficiency. *Science of The Total Environment*, 721, 137532.
- Hendroko Ia, R., Kawaroe, M., Salafudin, G. S, Fitrianto, N. E, Sari, D. W., & Sakri, Y. (2011). Estudos Preliminares de Biorrefinaria: Integração de Polpa e CO₂ como Resíduos de Biometano Digestor Para Microalgas *Scenedesmus* sp. Crescimento.
- Hijazi, O.; Munro, S.; Zerhusen, B., & Effenberger, M. (2016). Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1291–1300.
- Hussain, F., Shah, S. Z, Ahmad, H., Aubshait, S. A, Aubshait, H. A, Laref, A., ... & Iqbal, M. (2021). Microalgas uma opção ecológica e sustentável de tratamento de águas residuais: Aplicação de biomassa na produção de biocombustíveis e biofertilizantes. Uma revisão. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110603.
- Jain, D., Ghonse, S. S, Trivedi, T., Fernandes, G. L, Menezes, L. D, Damare, S. R. ... & Gupta, V. (2019). Fixação de CO₂ e produção de biodiesel por *Chlorella vulgaris* NIOCCV sob cultivo mixotrófico. *Bioresource technology*, 273, 672-676.
- Jiang, L.; Luo, S.; Fan, X.; Yang, Z., & Guo, R. (2011). Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO₂. *Applied energy*, 88, n. 10, 3336-3341.
- Kao, C. Y., Chiu, S. Y., Huang, T. T., Dai, L., Wang, G. H., Tseng, C. P., ... & Lin, C. S. (2012). Uma cepa mutante da microalga *Chlorella* sp. para a captura de dióxido de carbono do biogás. *Biomassa e bioenergia*, 36, 132-140.

- Karim, K., Klasson, T. K., Hoffmann, R., Drescher, S. R., Depaoli, D. W., & Al-Dahhan, M.H. (2005). Anaerobic Digestion of Animal Waste: Effect of mixing. *Bioresource Technology*, 96(14), 1607-1612.
- Konzen, E. A. (2005). Dejetos de suínos fermentados em biodigestores e seu impacto ambiental como insumo agrícola. In *Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: Simpósio Goiano De Avicultura, 7.; Simpósio Goiano De Suinocultura, 2., 2005, Goiânia. Anais... Goiânia: AVESUI Centro-Oeste, 2005. 56-64.
- Kochert, G. (1978). Carbohydrate determination by the phenol-sulfuric acid method. *Handbook of phycollogical methods, Phycollogical and biochemical methods.*, 95-97.
- Kriener, M. (2015). Água: quando a fonte seca. In: SANTOS, Maureen (Org.). Atlas da carne: fatos e números sobre os animais que comemos. Rio de Janeiro: Heinrich Böll Foundation, 68.
- Kong, W., Shen, B., Lyu, H., Kong, J., Ma, J., Wang, Z. & Feng, S. (2021). Revisão sobre a fixação de dióxido de carbono juntamente com a remoção de nutrientes de águas residuais por microalgas. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125975.
- Kumanowska, E., Saldaña, M. U., Zielonka, S., & Oechsner, H. (2017). Digestão anaeróbica em dois estágios de silagem de beterraba: o efeito do valor do pH nos parâmetros do processo e na eficiência do processo. *Bioresource technology*, 245, 876-883.
- Kunz, A., & Sulzbach, A. (2007). Kit Biogás portátil para análise de concentração de gás metano, amônia e gás sulfídrico em biogás. *Embrapa Suínos e Aves-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)*.
- Kuo, C. M., Chen, T. Y., Lin, T. H., Kao, C. Y., Lai, J. T., Chang, J. S. & Lin, C. S. (2015). Cultivo de *Chlorella* sp. GD usando águas residuais de suínos para produção de biomassa e lipídios. *Bioresource technology*, 194, 326-333.
- Liu, C.; Yuan, X.; Zeng, G.; Li, W., & Li, J. (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresour. Technol*, 99,882-888.
- Lourenço, S.O. (2006). Cultivo de Microalgas Marinhas: Princípios e Aplicações. *Rima Editora*.
- Lowry, O.H.; Rosebrough, N. J.; Farr, A. L., & Randall, R. J. (1951). Protein measurement with the folin phenol reagent. *The Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265-75.
- Lucas J.J., Souza, C., & Lopes, J. (2006). Construção e operação de biodigestores. *CPT*, 158.
- Lucas, J.; Santos, T. M. B., & Oliveira, R. A. (1999). Possibilidade de uso de dejetos no meio rural. In: Workshop Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira, 1., 1999, Campinas. Campinas: Memória Embrapa Meio Ambiente, 42.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Revisão sobre os resultados da pesquisa de biogás da digestão anaeróbica. *Revisões de energia renovável e sustentável*, 45, 540-555.
- Mata, T. M.; Martins, A. A., & Caetano, N.S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217-232.
- Matos, C. F., Paes, J. L., Pinheiro, E. F. M., & Campos, D. V. B. (2017). Produção de biogás a partir de dejetos de bovinos de leite, sob sistema orgânico e convencional de produção. *Revista engenharia agrícola*, 37(6).
- Mele, M., & Randazzo, L. 2019. A causal investigation on the determinants of CO₂ in China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(8), 665-671.
- Meyer, A. K. P, Ehimen, E. A., & Holm-Nielsen, J. B. (2018). Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 111, 154-164.
- Mezzari, M. P, da Silva, M. L, Nicoloso, R. S, Ibelli, A. M, Bortoli, M., Viancelli, A., & Soares, H. M. (2013). Avaliação da emissão de N₂O de um fotobiorreator tratando digerido de efluente suíno rico em amônia. *Bioresource technology*, 149, 327-332.
- Miyawaki, B., Mariano, A. B, Vargas, J. V. C, Balmant, W., Defrancheschi, A. C, Corrêa, D. O, ... & Kava, V. M. (2021). Biomassa derivada de microalgas e melhoria da produção de bioenergia através da purificação de biogás e tratamento de águas residuais. *Energia Renovável*, 163, 1153-1165.
- Miyawaki, B. (2014). Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos agroindustriais. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Mokarram, M., Saber, A., & Sheykhi, V. (2020). Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123380.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2010). *Fundamentos da termodinâmica de engenharia*. John Wiley & Filhos.
- Oliveira, P. A. V. (1995). Aspectos práticos do manejo de dejetos de suínos: Manejo da água - Influência no volume de dejetos produzidos. Florianópolis: EPAGRI/EMBRAPA-CNPSA, 29-33.
- Pan, S. Y., Tsai, C. Y., Liu, C. W., Wang, S. W., Kim, H., & Fan, C. (2021). Codigestão anaeróbica de resíduos agrícolas rumo à bioeconomia circular. *Iscience*, 24 (7), 102704.
- Pata, U. K. (2021). Renewable and non-renewable energy consumption, economic complexity, CO₂ emissions, and ecological footprint in the USA: testing the EKC hypothesis with a structural break. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 846-861.

- Perdomo, C. C. (1999). Suinocultura e meio ambiente. In: Workshop: Mudanças Climáticas Globais E A Agropecuária Brasileira, 1, 1999, Campinas. Memória. Embrapa Meio Ambiente, 43.
- Pokrant, E., Trincado, L., Yévenes, K., Terraza, G., Maddaleno, A., San Martín, B., ... & Cornejo, J. (2021). Determinação de cinco famílias antimicrobianas em excrementos de frangos de corte tratados terapeuticamente por cromatografia líquida de alta eficiência-espectrometria de massas em tandem. *Poultry Science*, 100 (9), 101313.
- Richmond, A. (2008). Manual de cultura de microalgas: biotecnologia e ficologia aplicada. John Wiley & Filhos. (ed.).
- Roratto, L. (2014). Análise e Construção de um Biodigestor para Pequenas Propriedades Rurais. Trabalho de Final de Curso, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Horizontina. Horizontina.
- Santos, J. H. T. (2004). Avaliação de um sistema de aquecimento do substrato na biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos. Viçosa: UFV, 66. Dissertação Mestrado.
- Siegrist, H., Vogt, D., Garcia-Heras, J. L., & Gujer, W. (2002). Mathematical model for meso- and thermophilic anaerobic sewage sludge digestion. *Environ. Sci. Technol.* 36 (5), 1113–1123.
- Sobhi, M., Guo, J., Cui, X., Sun, H., Li, B., Aboagye, D., Shah, G. M., & Dong, R. (2019). A promising strategy for nutrient recovery using heterotrophic indigenous microflora from liquid biogas digestate. *Science of The Total Environment*, 690, 492–501.
- Souza, C. F.; Lucas Júnior, J., & Ferreira, W.P.M., (2005). Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato - considerações sobre a partida. *Engenharia Agrícola*, 25(2).
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Aplicações comerciais de microalgas. *Journal of bioscience and bioengineering*, 101 (2), 87-96.
- Tápparo, D. C, Cândido, D., Steinmetz, R. L. R, Etzkorn, C., do Amaral, A. C, Antes, F. G., & Kunz, A. (2021). Melhoria da produção de biogás de dejetos suínos usando estratégias de pré-tratamento: estudos em escala de laboratório e aplicação em escala real. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100716.
- Tongprawhan, W., Srinuanpan, S., & Cheirsilp, B. (2014). Biocapture of CO₂ from biogas by oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid. *Bioresource technology*, 170, 90-99.
- Wilkie, A. C. (2003). Anaerobic digestion of flushed dairy manure. in: Proceedings—Anaerobic Digester Technology Applications in Animal Agriculture. *A National Summit*, 350-354.
- Xie, M., Qiu, Y., Song, C., Qi, Y., Li, Y., & Kitamura, Y. (2018). Otimização da condição de cultivo de *Chlorella sorokiniana* para produção simultânea de biomassa e lipídios via fixação de CO₂. *Bioresource Technology Reports*, 2, 15-20.
- Yan, C., & Zheng, Z. (2013). Performance of photoperiod and light intensity on biogas upgrade and biogas effluent nutrient reduction by the microalgae *Chlorella* sp. *Bioresource technology*, 139, 292-299.
- Ye, J., Li, D., Sun, Y., Wang, G., Yuan, Z., Zhen, F., & Wang, Y. (2013). Melhor produção de biogás a partir de palha de arroz por co-digestão com resíduos de cozinha e esterco de porco. *Gestão de Resíduos*, 33 (12), 2653-2658.
- Yuping, L., Ramzan, M., Xincheng L., Murshed, M., Awosusi A. A., BAH S. I., & Adebayo. T.S., (2021). *Determinants of carbon emissions in Argentina: The roles of renewable energy consumption and globalization*. *Energy Reports*, 7, 4747–4760.
- Zhang, Y.; Zheng, Y.; Zhu, Z.; Chen, Y., & Dong, H., (2021). Dispersion of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) from stored swine manure biogas digestate to the atmosphere. *Science of The Total Environment*, 761, 144108.
- Zhou, J., Zhang, R., Liu, F., Yong, X., Wu, X., Zheng, T., & Jia, H., (2016). Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure. *Bioresource Technology*, 217, 44-49.