

Artigo

Biodigestão anaeróbia a partir de combinações de dejetos e resíduos orgânicos: Produção de biogás e biofertilizante

Anaerobic biodigestion from combinations of waste and organic residues: Production of biogas and biofertilizer

José Cássio Ferreira de Sales¹; Camilo Allyson Simões de Farias²; Adriana Silva Lima³; Luiz Gualberto de Andrade Sobrinho⁴ e Roberlúcia Araújo Candeia⁵

¹Mestre em Sistemas Agroindustriais pela Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil. E-mail: cassioce@gmail.com;

²Doutor em Engenharia Civil pela Ehime University-Japão. E-mail: camilo.allyson@professor.ufcg.edu.br;

³Doutora em Ciências do Solo pela Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: adriana.silva@professor.ufcg.edu.br;

⁴Doutor em Ciências (Química Analítica) pelo Instituto de Química de São Carlos (IQSC-USP), São Carlos, São Paulo, Brasil. E-mail: luiz.gualberto@professor.ufcg.edu.br;

⁵Doutora em Ciências (Química Orgânica) pela Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil. E-mail: roberlucia.araujo@professor.ufcg.edu.br.

Submetido em: 01/11/2024, revisado em: 07/11/2024 e aceito para publicação em: 08/11/2024.

Resumo: A combinação de biomassas, temperaturas entre outros, podem afetar a eficiência e/ou acelerar o desempenho do processo de digestão anaeróbica, como promover maior produção de biogás e melhorias na nutrição do substrato (biofertilizante). Neste contexto, o objetivo dessa pesquisa foi de investigar a produção do biogás e a incorporação dos nutrientes ao biofertilizantes, a partir da combinação de misturas de dejetos suínos e restos de alimentos em um biodigestor canadense. A metodologia foi de pesquisa experimental, utilizando um biodigestor e operando em três fases. Cada fase procedeu com um fatorial 2x5, dois pontos de coletas e cinco épocas de amostragem, com três repetições. Foram monitorados a proporção das biomassas em função do tempo de retenção (35 dias). As análises, dos afluentes e efluentes, abrangeram as físico-químicas, macronutrientes e quantificação e qualificação do biogás gerado. Os resultados revelaram que em todas as fases ocorreram a produção de biogás. Porém, observou-se que o aumento de concentração de restos de alimentos aos dejetos suínos não elevou a produção de biogás, visto que nas fases II e III não foram superiores a fase I, sendo comprovada pelo modelo matemático de Chen. E, a produção de biogás em todas as fases obteve percentuais predominante em CH₄ superior ao CO₂. Outra observação, versou sobre a combinação das biomassas, visto agregarem aos substratos nas fases II e III, melhores concentrações de NPK do que a fase I, sendo essenciais para o desenvolvimento das plantas e nutrição do solo.

Palavras-chave: Bioenergia; Suinocultura; Resíduo Orgânico; Biodigestor; Metano; Adubo orgânico.

Abstract: The combination of biomass, temperatures, among others, can affect the efficiency and/or accelerate the performance of the anaerobic digestion process, such as promoting greater biogas production and improvements in substrate nutrition (biofertilizer). In this context, the objective of this research was to investigate the production of biogas and the incorporation of nutrients into biofertilizers, from the combination of mixtures of pig manure and food scraps in a Canadian biodigester. The methodology was experimental research, using a biodigester and operating in three phases. Each phase proceeded with a 2x5 factorial, two collection points and five sampling times, with three replications. The proportion of biomasses as a function of retention time (35 days) was monitored. The analyses of the effluents and effluents covered the physicochemical, macronutrient and quantification and qualification of the biogas generated. The results revealed that in all phases the production of biogas occurred. However, it was observed that the increase in the concentration of food remains in pig manure did not increase the production of biogas, since in phases II and III they were not higher than phase I, being proven by Chen's mathematical model. And, the production of biogas in all phases obtained predominant percentages in CH₄ higher than CO₂. Another observation was about the combination of biomasses, since they add to the substrates in phases II and III, better concentrations of NPK than phase I, being essential for plant development and soil nutrition.

Keywords: Bioenergy; Pig farming; Organic Waste; Biodigester; Methane; Organic fertilizer.

1 INTRODUÇÃO

A ascensão das atividades agrosilvopastoril, principalmente na produção de suínos e de pós-colheita, no território brasileiro, indica que a geração de resíduos continuará a aumentar e o seu manejo, tratamento e disposição devem ser seguidos de forma correta, buscando sempre o equilíbrio entre o meio social, econômico e ambiental (Araújo et. al., 2012; Mao et al, 2015; Wu, Cheng, Chang, 2020; Costa et al., 2022).

Os resíduos gerados por atividades da agropecuária, a partir dos confinamentos de animais, como a suinocultura, e em atividades de pós-colheita, processamento de alimentos entre outros, vêm sendo reaproveitados em vários países, a exemplo do Brasil, Índia, Coreia, como matéria-prima para processos tecnológicos, que visam alternativas de conversão em bioenergia (Leung et. al., 2010; Lee et. al., 2014; Jacob, Banerjee, 2016; Freitas et al., 2019; Granzotto et al., 2021).

Tal reaproveitamento também pode contribuir

para mitigar a poluição ambiental gerada por estes resíduos, os quais atuam na proliferação de vetores de doença, e na contaminação da água, solo e do ar (Cherubini et al., 2015; Wu, Cheng, Chang, 2020; Lauzurique et al., 2024). Nesse contexto, faz-se necessário utilizar-se de meios ecologicamente corretos e economicamente viáveis baseados no conceito de desenvolvimento sustentável.

As técnicas utilizando biodigestão anaeróbicas se destacam, pois, além de degradar os resíduos sólidos orgânicos, visando à estabilização do material inserido no biodigestor anaeróbico, convertem a matéria orgânica putrescível em biogás, o qual poderá ser aproveitado para a geração de energia térmica, elétrica e/ou mecânica (Balestieri, 2014; Oliveira et al., 2018; Lauzurique et al., 2024).

Outro benefício é a obtenção do biofertilizante, propício para o restabelecimento do teor de húmus do solo, melhorando as propriedades físicas, químicas e biológicas. Sabe-se, ainda, que o biofertilizante gerado pode ser aplicado diretamente sob a forma líquida ou desidratada, dependendo das condições locais de infraestrutura e necessidades das atividades humanas (Reis, 2012; Sawin et al., 2012; Schommer, Wenzel, Daroit, 2020).

A combinação de dois ou mais fatores, tais como concentração da biomassa, temperatura, pH, aditivo microbiológico entre outros, podem afetar a eficiência e/ou acelerar o desempenho do processo da biodigestão, em prol de viabilizar a obtenção de H_2 e CH_4 não apenas para energia, mas também para o pré-tratamento do substrato orgânico (Mao et al., 2015; Pin et al., 2020).

Chernicharo et al. (2007) relataram que a maioria dos resíduos sólidos orgânicos, em condições adequadas, são facilmente degradáveis pela ação dos microrganismos, a exemplo do pó de café e chá, cascas e bagaços de frutas e verduras, aparas e podas de jardim, entre outros. Pin et al. (2020) afirmam que para obter melhor produção de metano, se faz necessário conhecer a “relação ideal” de substrato/água. Lee et al (2019) estudaram que o impacto das relações dos substratos/inóculos em biorreatores de bateladas, tanto pode promover melhoria no rendimento de metano (38%) e, boa estabilidade no início do processo de codigestão.

Granzotto et al (2021) estudando a biodigestão anaeróbica utilizando como os resíduos alimentares provenientes de restaurante universitário, em biodigestor tipo indiano, observaram os seguintes pontos: eficácia na redução de DQO e DBO 5, apesar da grande heterogeneidade na composição do substrato; rendimento da produção de biogás de 60% de CH_4 em média, a partir de $67 L.kg^{-1}$ de substrato; e o acúmulo de nitrogênio total no biodigestor não reduz a produção de metano.

O conhecimento dos nutrientes, que compõe um material, é de fundamental importância no que se refere à aplicação e/ou utilização para fins agrícolas. Os dejetos líquidos da suinicultura vêm, nos últimos anos, ganhando destaque no setor agrícola, pois esse material, se reciclado, além de minimizar os impactos ambientais, pode ser útil no próprio processo de produção agrícola (Adnane et al., 2024).

Assim como conversão dos resíduos de alimentos em biofertilizante, promovendo no setor da agricultura melhor nutrição trazidas para o solo em relação

ao fertilizante químico sintético (Du et al., 2018; Adnane et al., 2024). Moraes et al. (2014), explica que a crescente utilização destes materiais como fertilizantes, se deu em virtude de melhores concentrações de nutrientes, principalmente, nitrogênio, fósforo e potássio, que são necessários para o desenvolvimento das plantas.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo investigar a produção do biogás e a incorporação dos nutrientes do biofertilizante a partir da combinação de misturas de dejetos suínos e resíduos de alimentos em biodigestor canadense.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa assume natureza básica, de caráter exploratório e descritivo, e com procedimento experimental (Gerhardt, Silveira, 2009).

A pesquisa foi realizada em uma área, devidamente selecionada, no Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar (CCTA), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O *campus* está localizado na cidade de Pombal-PB, que fica a cerca de 370 km da capital João Pessoa-PB.

O município de Pombal-PB está localizado em região de *Caatinga* no Sertão Paraibano. De acordo com o IBGE (2010), o município tem uma população de 32.110 habitantes, uma área total de aproximadamente 889 km² e apresenta uma densidade populacional de 36,13 de habitantes por quilômetro quadrado, e está localizado nas seguintes coordenadas geográficas 6°46'11''S e 37°48'00''O.

O biodigestor do tipo Canadense foi utilizado neste trabalho, juntamente com as matérias orgânicas, a saber: dejetos de suínos e resíduos de alimentos (cascas de frutas, legumes e verduras). O referido biodigestor foi constituído de lona de Policloreto de Vinila (PVC) flexível que apresenta uma entrada, por onde foi inserido o material a ser tratado, uma saída para descarga do efluente já estabilizado, e outra para o gás gerado no processo de digestão anaeróbica. Apresenta um volume total de 10 m³, considerando o volume da zona de digestão – local onde fica o material a ser tratado – e o volume da câmara – local onde fica acumulado o biogás do biodigestor.

Os dados adquiridos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) indicaram que o comportamento climático de Pombal-PB no período de abril a dezembro de 2016, considerando a temperatura máxima, oscilou entre 32,74 a 36,95 °C, a média entre 26,85 a 30,24 °C e a mínima entre 20,91 a 24,61 °C, a insolação variou entre 7,95 a 11,15 horas por dia, e a umidade do ar variou entre 53,23 a 81,69%.

2.1 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O sistema funcionou durante oito meses, entre abril a dezembro, totalizando 240 dias, sendo o experimento dividido em três fases, e para cada fase foram tratados 3.200 kg de materiais, em um período de 80 dias. Na fase I, que serviu de referência para as duas fases subsequentes, o biodigestor foi alimentado somente com dejetos de suínos. Na fase II, houve a adição dos resíduos de alimentos aos dejetos de suínos, sendo que do total de

material tratado nesta fase, 75% corresponderam aos dejetos de suínos e os 25% corresponderam aos resíduos de alimentos. A fase III, a quantidade de materiais foi de igual porcentagem, ou seja, 50% de dejetos suínos e 50% de resíduos de alimentos.

Toda a alimentação (materiais orgânicos) a ser inserido no biodigestor canadense ocorreu de forma semicontínua. E, em cada fase foi realizada a proporção do substrato/água de 1:15. É importante ressaltar que, para cada fase foi mensurado a umidade dos resíduos e dejetos orgânicos, a fim de saber a quantidade de água necessária para a diluição.

O Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) obedecido em cada fase dos experimentos foram de 35 dias, antes da retirada das amostras do biogás e do efluente (coletado na saída do biorreator) para análise. Após a primeira coleta (no 35º dia) foram coletadas novas amostras, do biogás, no 50º dia, no 65º dia e no 80º dia, se encerrando, assim, a fase e se iniciando a próxima.

Em cada fase de estudo, se fez nos experimentos, um delineamento inteiramente casualizado, num esquema fatorial 2x5, dois pontos de coletas e cinco épocas de amostragem, com três repetições.

2.2 CARACTERIZAÇÃO

2.2.1 Físico-química

As análises físicas e químicas foram realizadas no Laboratório de Resíduos Sólidos (LABRES), no Laboratório de Análises de Água (LAAG) e no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas, da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* Pombal, PB. Onde foram seguidos os métodos padrões determinados pelo *Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005) e Tedesco *et al* (1995), sendo que as análises ficaram divididas da seguinte forma: Análises Físicas: Sólidos Totais (ST), Fixos (SF) e Voláteis (SV); Condutividade elétrica (CE); E, Químicas: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Alcalinidade Total (AT), pH e Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K).

2.2.2 Quantificação e qualificação do biogás

A estimativa de produção de metano, para todas as fases do experimento, foi realizada utilizando um modelo cinético proposto por Chen (1983). De acordo com Aires *et. al.* (2014), o modelo matemático proposto por Chen (1983) é um dos mais utilizados e mais confiáveis para a estimativa de produção de biogás. O referido modelo está descrito na Eq:

$$B = B_0 \left(1 - \frac{K}{\mu_m \theta - 1 + K} \right)$$

Em que, **B** é a produção de metano a partir do resíduo ($m^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$); **B₀** é a produção máxima de metano ($m^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$); **K** é a constante (adimensional) cinética do processo; **μ_m** é o crescimento máximo específico de microrganismos (dias^{-1}); e **θ** é o tempo de residência (dias).

A produção máxima de metano (**B₀**) varia de

acordo com a espécie de animal, a dieta, a idade do esterco, o método de coleta e armazenamento e quantidade de materiais estranhos (como sujeiras em geral) incorporados nos resíduos. Assim, o método mais utilizado para obter valores de **B₀** é usar dados de fontes publicadas específicas de cada País, medidos com um método padronizado (Hashimot *et al.*, 1981; IPCC, 2006). Nesta pesquisa foi utilizado o valor **B₀** = 0,29 $\text{Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$, valor este recomendado pelo IPCC (2006) para os países latino-americanos, no que se refere à emissão de metano por dejetos de suínos.

O crescimento máximo específico de microrganismos (**μ_m**) depende da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) em que o resíduo apresenta no processo de biodigestão anaeróbica. Nessas circunstâncias, Hashimot *et al.* (1981) desenvolveram o **μ_m** para a seguinte Eq. (2):

$$\mu_m = 0,013 T - 0,129$$

Em que, **T** é a temperatura do resíduo ($^{\circ}\text{C}$).

A constante cinética do processo (**K**), Chen (1983) é dependente da concentração de sólidos voláteis (SV) na entrada do biodigestor, presente nos dejetos suínos. O autor comenta que **K** é um indicador de performance do biodigestor, podendo, o parâmetro, ser influenciado por substâncias potencialmente inibidoras presentes no dejetos. Deste modo, o valor de **K** para a digestão anaeróbica de dejetos de suínos pode ser estimado pela Eq.:

$$K = 0,6 + 0,006 \exp^{(0,1185 \text{ SV}_{\text{Entrada}})}$$

Em que, **SV_{Entrada}** é a concentração de sólidos voláteis na entrada do biodigestor.

A qualidade do biogás, gerado em todas as fases do experimento, foi verificado através do kit desenvolvido pela empresa Embrapa Suínos e Aves. Este kit permite analisar de forma simples e rápida a composição dos gases do biogás. Foram realizadas quatro leituras, tais como amônia, gás sulfídrico, gás carbônico e metano. A técnica de leitura da amônia e gás sulfídrico consiste pelo método colorimétrico, depois do contato biogás/solução para os respectivos gases. A leitura do gás carbônico e metano foram realizados pela diferença entre o volume de gás inicial e final, também depois do contato biogás/solução utilizando seringas.

2.2.3 Análise Estatística

A avaliação estatística dos resultados obtidos para as análises físicas e químicas foram realizadas por meio de comparação de médias, utilizando o Programa Computacional PAST 3 (Hammer *et al.*, 2017).

Os dados foram submetidos à análise de variância (Anova), teste de comparação de média e desvio padrão de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os substratos foram caracterizados físico-

quimicamente antes, durante e ao fim de cada fase dos experimentos, os quais serão melhor arguidos em outro momento. O ponto a ser apresentado e debatido neste trabalho, será o estudo com a produção dos gases obtidos em cada fase. Logo, a Tabela 1, expõe os resultados obtidos com os substratos antes de serem inseridos (Entrada dos afluentes em cada fase do experimento) no biodigestor

canadense e ao fim (Saída dos efluentes em cada fase do experimento) dos 80 dias, com o intuito de compreendermos o desdobramento do metabolismo anaeróbico com a produção do biogás, e a incorporação dos macronutrientes, NPK, ao biofertilizante.

Tabela 1 — Caracterização dos dejetos suínos e das misturas de dejetos suínos e resíduos de alimentos

Parâmetros	Fase I (DS)		Fase II (75:25 – DJ e RA)		Fase III (50:50 – DS e RA)	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
Ph	6,0	7,0	6,4	7,2	6,2	7,1
EC (mS.cm ⁻¹ a 25 °C)	5,7	5,9	3,8	6,4	5,0	7,1
AT, (mg de CaCO ₃ .L ⁻¹)	1076,50	1614,2	778,16	1743,0	903,37	1875,8
ST (mg.L ⁻¹)	37026,53	7833,6	49051,06	28435,6	27522,03	9815,9
SV (mg.L ⁻¹)	28593,65	5286,8	39690,37	20755,0	22669,37	6537,3
SF (mg.L ⁻¹)	8432,89	2546,8	9360,69	7680,6	4852,66	3278,7
DQO (mg de O ₂ .L ⁻¹)	49154,14	421,9	52091,77	22402,2	33734,94	13386,9

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Durante todo o experimento as temperaturas permaneceram na faixa mesofílica entre 30 a 40 °C, considerada ideal para o processo de digestão anaeróbia (Chernicharo, 1997).

De acordo com os dados da Tabela 1, a fase II conduziu um comportamento mais satisfatório para produção do biogás, em virtude dos valores dos pH's dos afluentes e efluentes nesta referida fase serem menos acidificados em relação as demais, favorecendo melhor atividades das bactérias metanogênicas. Corroborando com os parâmetros de DQO, sólidos totais, fixos e voláteis que apresentaram redução do material orgânico inserido na entrada e biodegradado no ponto de saída. No entanto, tal degradação poderia ter sido mais satisfatória, visto que os substratos não foram totalmente estabilizados em função de fatores como o tempo de retenção hidráulica (TRH) ter sido menor (Veroneze et al., 2019), a lixiviação do substrato/água (Pin et al., 2020), e/ou a falta de introdução

de inóculo alcalino (Lee et al., 2019), com o intuito facilitar o desenvolvimento do metabolismo das bactérias e assim, aumentar a liberação do biogás.

3.1 MACRONUTRIENTES: NITROGÊNIO (N), FÓSFORO (P) E POTÁSSIO (K)

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios dos parâmetros de nitrogênio total (%), fósforo (%) e potássio (%), bem como suas concentrações totais. Observa-se que as maiores concentrações de NPK, na entrada do biodigestor, foram encontradas na fase II (4,35 %), justamente no período em que se foi adicionado os resíduos sólidos orgânicos, podendo ser esta a causa do aumento considerável dos valores de N e K se comparada à fase anterior. Já os valores, considerando a saída do biodigestor, foram observados maiores na terceira fase do experimento, com 4,17 %.

Tabela 2 — Monitoramento dos nutrientes nas respectivas fases da pesquisa.

Parâmetros	Fase I		Fase II		Fase III	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
N-total (%)	1,73	1,95	2,38	1,62	2,23	2,06
P (%)	1,25	1,23	0,93	0,97	1,07	1,19
K (%)	0,32	0,81	1,04	1,45	0,44	0,92
NPK (%)	3,30	3,99	4,35	4,03	3,74	4,17

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Fornari (2002) argumenta que o biofertilizante possui teores de nutrientes iguais e até mais concentrados que o do material original. A fermentação anaeróbia faz com que haja menos perda de nutrientes, principalmente o N, cujo teor médio total é de 0,7%; o de P é de 0,5% e o de K, 0,7%. E, neste caso os valores encontrados (Tabela 2) foram bem superiores aos citados por Fornari (2002).

O biofertilizante, líquido rico em matéria orgânica, pode ser usado como adubo no solo

enriquecendo-o e, são usados com frequência no setor agrônomico em cultivos de culturas em geral. Uma das principais vantagens do uso de biofertilizantes na agricultura é o baixo custo, e não geram problemas quanto à acidez e degradação do solo, como ocorre com o uso de fertilizantes de origem química (Barbosa, Langer, 2011).

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios, coeficientes de variação e desvio padrão das concentrações de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), nos afluentes e efluentes das fases I, II e III.

Tabela 3 — Valores médios, coeficientes de variação (CV) e desvio padrão, das variáveis Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), nas respectivas fases da pesquisa.

Parâmetros	Períodos	Fases			F-Value	
		I	II	III		
N (%)	Entrada	35	1,7 b	2,4 b	2,6 a	14,82**
		50	1,5 b	3,0 a	2,9 b	8,22*
		65	1,9 a	2,2 a	1,8 a	0,99 ns
		80	1,8 a	1,9 a	1,7 a	0,32 ns
		Média	1,72	2,37	2,25	
		DP	0,17	0,47	0,59	
		CV (%)	9,90	19,56	26,29	
	Saída	35	1,8 a	1,5 a	2,0 a	2,48 ns
		50	2,1 a	1,7 a	2,3 a	3,79 ns
		65	1,8 a	1,9 a	1,8 a	0,34 ns
		80	2,0 a	1,5 a	2,2 a	3,16 ns
		Média	1,92	1,65	2,07	
		DP	0,15	0,19	0,22	
		CV (%)	7,79	11,60	10,68	
P (%)	Entrada	35	1,4 a	0,7 b	1,1 b	7,36*
		50	1,4 a	0,9 b	0,9 b	17,82**
		65	1,0 a	1,0 a	1,1 a	0,38 ns
		80	1,2 a	1,1 a	1,2 a	1,00 ns
		Média	1,25	0,92	1,07	
		DP	0,19	0,17	0,13	
		CV (%)	15,32	18,46	11,70	
	Saída	35	1,4 a	0,9 b	1,4 a	75,00**
		50	1,3 a	0,9 a	1,1 a	2,12 ns
		65	1,1 a	1,0 a	0,9 a	9,60 ns
		80	1,2 b	1,1 b	1,4 a	3,53*
		Média	1,25	0,97	1,2	
		DP	0,13	0,09	0,24	
		CV (%)	10,33	9,82	20,41	
K (%)	Entrada	35	0,2 a	0,7 a	0,8 a	4,23 ns
		50	0,4 b	1,4 a	0,3 b	9,09*
		65	0,5 a	0,8 a	0,3 b	4,23 ns
		80	0,1 b	1,3 a	0,4 b	5,28*
		Média	0,30	1,05	0,45	
		DP	0,18	0,35	0,24	
		CV (%)	60,86	33,45	52,90	
	Saída	35	0,5 b	1,7 a	0,3 b	6,81*
		50	0,9 a	2,2 a	1,1 a	1,70 ns
		65	0,9 b	1,0 b	1,8 a	27,16**
		80	1,0 a	0,9 b	0,5 b	5,37*
		Média	0,82	1,45	0,92	
		DP	0,22	0,61	0,67	
		CV (%)	26,88	42,32	72,99	

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

O nitrogênio dos afluentes do biodigestor apresentou valores médios, nas fases I, II e III, na seguinte ordem, 1,72%; 2,37%; e 2,25%, respectivamente, entretanto, os dados dos períodos 65° e 80° dias, não apresentaram diferença significativa ($P > 0,05$), por outro lado, os valores médios referentes ao período 35° dias diferiram significativamente a 1% de probabilidade e no período de 50° dias a 5% de probabilidade. Os coeficientes de variação das fases II e III indicaram maior

heterogeneidade dos dados, em relação a fase I.

Os níveis médios de concentração do nitrogênio (Tabela 3) nos efluentes foram de 1,92; 1,65 e 2,07 %, respectivamente na fase I, II e III. Em relação aos afluentes, nota-se que houve uma redução, nos efluentes, do parâmetro nas fases II e III, sendo que a fase I apresentou a elevação do parâmetro. Em todos os tratamentos verificados, constatou-se que os dados não apresentaram diferença significativa ($P > 0,05$).

Para o fósforo, nos afluentes e efluentes do

biodigestor, apresentou queda de suas concentrações ao passo que foi adicionando 25% de material orgânico e voltou a subir quando se adicionou 50% de material orgânico junto aos dejetos de suínos. Este aumento pode estar relacionado à grande quantidade de cascas de bananas que foi inserido no biodigestor, na terceira fase do experimento, para suprir à quantidade de resíduos preestabelecida. Borges et al (2009) explicam que um dos componentes comuns da casca de banana é o fósforo.

Mesmo assim, as melhores médias, nos afluentes, foram verificadas na fase I. Considerando todos os tratamentos, os dados do período 35 diferiram significativamente a 1% de probabilidade, no período 50, os dados diferiram a 5% de probabilidade, já os períodos 65° e 80° dias não diferiram significativamente entre si (P>0,05).

No que se refere à porcentagem de fósforo nos efluentes, do biodigestor, pode-se observar que os dados dos períodos 35° e 80° dias diferiram significativamente entre si, à probabilidade de 5 e 1%, respectivamente, quando submetidos ao teste Tukey. Os coeficientes de variação ficaram entre 11,70% e 18,46%, indicando heterogeneidade das amostras dos afluentes, e entre 9,82% (Homogêneo) e 20,41% (Heterogêneo), para os efluentes.

Quanto aos valores de concentração do potássio (Tabela 3), na entrada do biodigestor, observou-se que os dados não foram significativos (P>0,05) nos períodos 35° e 65° dias. Já para o período 50° e 80° dias, os dados diferiram significativamente (P<0,05). Os valores médios deste parâmetro aumentaram de 0,30%, na fase I, para 1,05% e 0,45%, nas fases II e III, respectivamente. Esse aumento pode estar relacionado à adição de materiais

orgânicos no processo, agregando maiores concentrações desse macronutriente ao substrato. Os elevados valores do coeficiente de variação indicam a heterogeneidade dos dados dos afluentes.

Agora, analisando, pelo teste Tukey, o potássio nos efluentes do biodigestor observou-se não significância dos dados (P>0,05) no período 50°, os dados diferiram significativamente (P<0,01) nos períodos relacionados à 50° e 80° dias, sendo que no período 65° dias, os dados diferiram significativamente a probabilidade de 5%. Assim como os dados dos afluentes, a média geral dos efluentes subiu, quando adicionado o material secundário aos dejetos de suínos, indicando que a mistura favoreceu no aumento do parâmetro. Já o coeficiente de variação indicou heterogeneidade nas amostras, nos respectivos períodos dos tratamentos.

3.2 QUANTIFICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Os resultados referentes à estimativa da produção de metano a partir do modelo matemático proposto por Chen (1983) encontram-se na Tabela 4. Observa-se que o maior valor médio observado foi obtido na fase I, com 0,271 N.m³ CH₄/Kg SV, seguida pelas fases II e III, com 0,267 e 0,255 N.m³ CH₄/Kg SV, respectivamente. Deste modo, pode-se dizer que a adição de materiais orgânicos aos dejetos de suínos não potencializou a produção de metano no biodigestor, mesmo nas fases II e III apresentando valores de sólidos voláteis superiores à fase I.

Tabela 4 — Estimativa da produção de metano em cada fase, de acordo com o modelo de Chen

	HRT ¹	T ²	VS _{input} ³	μ _m ⁴	K ⁵	B ₀ ⁶	B ⁷
Fase I	35	28,5	28,59	0,24	0,778	0,29	0,263
	50	29,5	4,18	0,25	0,610	0,29	0,276
	65	29,0	3,61	0,25	0,609	0,29	0,279
	80	28,5	43,37	0,24	1,624	0,29	0,266
	Média	28,87	19,94	0,246	0,905	0,29	0,271
Fase II	35	26,7	39,69	0,22	1,262	0,29	0,244
	50	28,0	28,56	0,24	0,777	0,29	0,270
	65	28,5	26,54	0,24	0,739	0,29	0,276
	80	30,0	27,19	0,26	0,750	0,29	0,279
	Média	28,29	30,49	0,239	0,882	0,29	0,267
Fase III	35	29,5	22,67	0,25	0,688	0,29	0,267
	50	30,0	45,6	0,26	1,933	0,29	0,250
	65	29,8	55,29	0,26	4,803	0,29	0,222
	80	30,0	27,3	0,26	0,752	0,29	0,279
	Média	29,8	37,72	0,259	2,044	0,29	0,255

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Espera-se que os baixos valores de produção de metano nas Fases II e III, estão relacionados à constante cinética do processo (K). Os resultados revelaram que quanto maiores foram os valores de sólidos voláteis, maiores foram os resultados de K. Chen (1983) afirma que K é um indicador da performance do biodigestor, sendo

que este parâmetro pode ser influenciado por substâncias potencialmente inibidoras presentes no dejetos.

Quanto ao crescimento específico máximo dos microrganismos (μ_m), pode-se observar (Tabela 4), que quando as temperaturas médias do biodigestor se elevam o parâmetro também aumenta. Isso comprova que a temperatura influencia, diretamente, no crescimento e

desenvolvimento dos microrganismos anaeróbios.

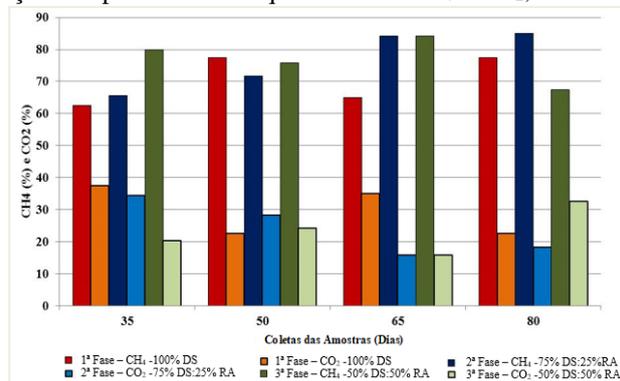
Aires et. al. (2014), verificaram o desempenho do processo de biodigestão anaeróbia de dejetos suínos em uma unidade de produção de leitões (UPL) e a qualidade do efluente para uso como fertilizante orgânico, obtiveram, aplicando o modelo matemático de Chen (1983), uma produção específica de biogás de cerca de 0,338 N.m³ CH₄/kg SV. Enquanto Halmeman (2014), estudando sobre a implantação de um sistema biodigestor em uma propriedade rural no município de Mamborê, no Paraná, encontrou resultados, durante um TRH de 30 dias e a temperaturas da biomassa variando de 20 a 30 °C, entre 0,099 a 0,108 N.m³ CH₄/kg SV.

A qualidade do biogás gerado, nas fases experimentais do estudo, foi realizada utilizando um kit

desenvolvido pela empresa Embrapa Suínos e Aves, como citado na metodologia, onde se buscou a determinação de quatro gases, a saber: gás metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), gás sulfídrico (H₂S) e gás amônia (NH₃). As Figuras 1, 2 e 3, mostram os comportamentos das variáveis no decorrer das fases do experimento.

Os valores percentuais de concentração de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), mostrados na Figura 1, revelam que a quantidade de CH₄ foi superior, em relação ao CO₂, em todas as fases da pesquisa. Isso comprova o que é citado na literatura, com relação à maior presença de CH₄ no biogás gerado a partir a biodigestão anaeróbia.

Figura 1 — Variação dos percentuais de qualidade do CH₄ e CO₂, em cada fases da pesquisa.



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Os maiores valores de CH₄ foram observados na fase III (Figura 1), com um valor médio de 76,9%, seguido pelas fases II e I, com 76,6 e 70,6%, respectivamente. Era esperado que a última fase da pesquisa apresentasse valores elevados de CH₄, pelo fato do ambiente interno do biodigestor nesta fase, considerando o tempo decorrido, foi mais estável e complexo em relação à fase I e II.

Silva et. al. (2012) explica que a produção do biogás, a partir da biomassa, começa a se processar por volta de 20 dias. Por outro lado, os maiores valores de CO₂ foram encontrados na primeira fase, com valor médio de 29,4%, acompanhado pela fase II, com valor médio de 24,4, e pela fase III, com 23,1%.

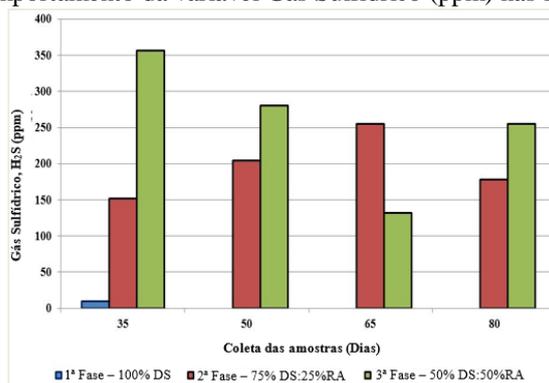
Realizou-se, também, a queima do biogás gerado, em suas respectivas fases. E, verificou-se a incidência da chama azul-clara, o que indicou condizer com a cor indicada pela literatura. Desta forma, a queima

do biogás, durante as fases da pesquisa, além de aliviar a pressão interna do biodigestor indicou a elevada concentração de CH₄ (acima de 60%), conforme Fig. 1.

O CH₄ é um gás incolor, sendo um dos produtos finais da fermentação anaeróbia de diferentes tipos de resíduos. Além disso, é caracterizado como sendo altamente combustível e inflamável, produzindo chama azul-clara, onde a sua queima gera pouquíssima ou nenhuma poluição (Silva et. al., 2012).

A quantificação do parâmetro gás sulfídrico (Figura 2) apresentou, na primeira fase do experimento, zero (0 ppm) de H₂S. Esse fator pode estar relacionado com o tempo que o biogás ficou armazenado, em garrafas PET, para posterior análise, até a aquisição do equipamento de leitura dos parâmetros do biogás. Além disso, a presença de água dentro das garrafas PET pode ter influenciado e reagido com o H₂S, formando um ácido líquido inorgânico.

Figura 2 — Comportamento da variável Gás Sulfídrico (ppm) nas fases da pesquisa.



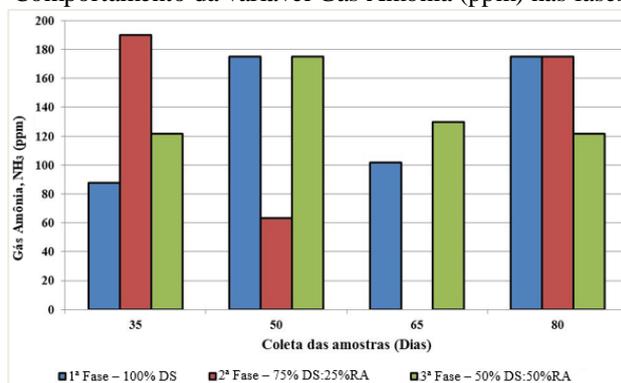
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Em relação ao comportamento do gás sulfídrico nas fases II e III, as maiores concentrações foram encontradas na fase III, com valor médio de 256 ppm, seguida pela fase II com 197,17 ppm. A quantidade elevada de gás sulfídrico pode ocasionar sérios danos, tanto ao meio ambiente como na saúde e o bem-estar da população. Sampaio et al. (2006) relata que este gás pode causar sérios danos à saúde humana e dos animais, sendo que seu odor forte é detectável a partir de 0,01 ppm. Para o autor o H₂S na concentração entre 50 a 200 ppm ocasiona perda do apetite, fotofobia, vômitos e diarreias aos animais.

Por fim, a última variável do biogás analisada foi o gás Amônia, conforme a Figura 3. A primeira e a

terceira fase apresentaram valores médios próximos, de produção do gás, com 134,8 e 137,1 ppm, respectivamente. Na segunda fase, o valor médio foi de 107,1 ppm, entretanto, houve um decréscimo acentuado entre 50° e 65° dias de análises, apresentando valor zero no 65° dia. A adição dos resíduos de alimentos aos dejetos de suínos pode ter influenciado no aumento na atividade microbiana, para a estabilização dos resíduos, uma vez que altas concentrações de amônia podem ser tóxicas às bactérias anaeróbias (Ruiz, 1992). E, segundo Sampaio et al. (2006), o gás amônia é detectável, pelo homem, a partir de concentrações de 20 ppm, sendo tóxico e mais leve que o ar.

Figura 3 — Comportamento da variável Gás Amônia (ppm) nas fases da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A associação dos dejetos suínos e resíduos orgânicos, compostos por cascas de frutas e vegetais, podem ser considerados como bons substratos para a digestão anaeróbia, embora que as proporções trabalhadas das misturas dejetos suínos/resíduos de alimentos não tenham apresentados concentrações bastante elevadas no sentido de potencializar o nível de obtenção de biogás. Visto que as fases II (0,267 N.m³ CH₄/Kg SV) e III (0,255 N.m³ CH₄/Kg SV) obtiveram produção de biogás satisfatória, porém não foram superiores a fase I (0,271

N.m³ CH₄/Kg SV), sendo comprovada pelo modelo matemático de Chen. O biogás nas fases I, II e III apresentaram concentrações ricas em metano, CH₄, respectivamente de 70,6, 76,6 e 76,9%.

As combinações dessas biomassas agregaram, ainda, aos substratos nas fases II e III, concentrações melhores de NPK do que a Fase I, os quais são essenciais para o desenvolvimento das plantas e nutrição do solo. A incorporação dos macronutrientes (NPK) ao biofertilizante mostrou-se eficaz, fornecendo ao sistema equilíbrio mínimo entre as biomassas inseridas. Dentre as fases, a III obteve concentrações melhores de NPK, sendo ideal como

adubo orgânico.

Por fim, a combinação então investigada neste estudo pode ser aprimorada e empregada tanto por produtores unifamiliares até consórcios de agroindústrias, pois, além de ser uma forma eficiente de tratamento de resíduos do setor agrosilvopastoril, agrega valor aos produtos gerados a partir do tratamento, a exemplo da produção de biogás e o biofertilizante.

REFERÊNCIAS

ADNANE, I.; TAOUMI, H.; ELOUAHABI, K.; LAHRECH, K.; OULMEKKI, A. Valorization of crop residues and animal wastes: Anaerobic co-digestion technology. *Heliyon*, v. 10, p.26440, 2024.

AIRES, A.W.; SILVA, F. M.; CASTRO, V. M. U.; WENZEL, B. M. Avaliação do desempenho de um biodigestor canadense modificado no tratamento de dejetos de suínos. *Engvista*, v. 16, p. 329-338, 2014.

APHA. American Public Health Association. **Standard Methods for the Examinations for Water and Wastewater**. Washington, D.C: 21th edition. 2005.

ARAÚJO, I.S.; OLIVEIRA, J. L.R.; ALVES, R. G. C. M.; BELLI FILHO P.; COSTA, R. H. R. D. A. Avaliação de sistema de tratamento de dejetos suínos instalado no Estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p. 745–753, 2012.

DUA, C.; ABDULLAH, J. J.; GREETHAM, D.; FU, D.; M YU, REN, L.; LI, S.; LU, D. Valorization of food waste into biofertiliser and its field application. *Journal of Cleaner Production*, v. 187, p. 273-284, 2018.

BALESTIERI, J. A. P. **Geração de energia sustentável**. São Paulo: Editora Unesp. 1º Edição, 2014, 362p.

BORGES, A. D. E M.; PEREIRA, J.; LUCENA, E. M. P. Caracterização da farinha de banana verde. *Revista de Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.29, p. 333-339, 2009.

BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. *Unesc & Ciência ACSA*, v. 2, p. 87-96, 2011.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. *Agricultural Wastes*, v. 8, p. 65-81, 1983.

CHERNICHARO, C. L.; RUTKOWSKI, E.W.; VOLSCHAN JUNIOR, CASSINI, I.; S. T. A. **Resíduos Sólidos: processamento de resíduos sólidos orgânicos: guia do profissional em treinamento: nível 2/Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.)**. Belo

Horizonte: ReCESA, 2007, 68p.

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

COSTA, G. G da; SANTOS, I. F. S. dos; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; MACHADO, G. de O.; BARBEDO, M. D. G. Mapping and energy analysis of Brazilian bioenergy power potential for three agricultural biomass byproducts. *Journal of Cleaner Production*, v. 349, p. 131466, 2022.

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

FORNARI, E. **Manual prático de agroecologia**. São Paulo: Aquariana, 2002, 237 p.

GRANZOTTO, F.; AITA, C.; SILVEIRA, D.D.; MAYER, F.D.; PUJOL, S.B.; PINAS, J.A.V; HOFFMANN, R. Use of anaerobic biodigestor in the treatment of organic waste from a university restaurant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, p 105795, 2021

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa. Coordenação: UAB/UFRGS e SEAD/UFRGS**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. 120 p.

HALMEMAN, M. C. R.; STACCHISSINI, M. G.; DAMACENO, F. M.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; PUTTI, F.F. The deployment of biodigester systems in rural properties. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 8, p. 351-360, 2014.

HAMMER, O.; HARPER, D. A. T.; RIAN, P. D. **Past: palaeontological statistics software package for education and data analysis**. Version 3, 2017. Disponível em: <https://folk.uio.no/ohammer/past/past3manual.pdf>.

HASHIMOT, A.G.; CHEN, Y. R.; VAREL, V. H. **Theoretical aspects of anaerobic fermentation: State-of-the-art**. In: Livestock wastes: A renewable resource. ASABE, St. Joseph, MI 49085, 95, p. 86-91, 1981.

IPCC. **Intergovernmental Panel On Climate Change**. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 10: Emissions From Livestock And Manure Management. 2006.

JACOB, S.; BANERJEE, R. Modeling and optimization of anaerobic codigestion of potato waste and aquatic weed by response surface methodology and artificial neural network

coupled genetic algorithm. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 386-395, 2016.

LAUZURIQUE, Y.; SEGURA, S.; GUERRA, S.; CARVAJAL, A.; HUILINIR, C.; CASTRO, I.P. Enhancing methane production using various forms of steel shavings and their effect on microbial consortia during anaerobic digestion of swine wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, p. 113764, 2024.

LEE, J.; HWANG, B.; KOO, T.; SHIN, S. G.; KIM, W.; HWANG, S. Temporal variation in methanogen communities of four different full-scale anaerobic digesters treating food waste-recycling wastewater. **Bioresource Technology**, v. 168, p. 59-63 2014.

LEE, E.; BITTENCOURT, P.; CASIMIR, L.; JIMENEZ, E.; WANG, M.; ZHANG, Q.; ERGAS, S. J. Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste, yard waste and waste activated sludge. **Waste Management**, v. 95, p. 432-439, 2019.

LEUNG, D. Y. C.; WU, X.; LEUNG, M. K. H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**, v. 87, p. 1083-1095, 2010.

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

MORAES, M. T.; ARNUTI, F.; SILVA, V.R.; SILVA, R. F.; BASSO, C. J.; ROS, C. O. D. A. Dejetos líquidos de suínos como alternativa a adubação mineral na cultura do milho. **Ciências Agrárias**, v. 35, p. 2945-2954, 2014.

OLIVEIRA, L. R. G.; SANTOS FILHO, D. A.; VASCONCELOS, K. C.; LUCENA, T.V.; JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, A. F. M. S. Methanization potential of anaerobic biodegradation of solid food waste. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 69-73, 2018.

PIN, B. V. R.; BARROS, R. M.; LORA, E. E. S.; OLMO, O. A.; SANTOS, I. F. S.; RIBEIRO, E. M.; ROCHA, J. V. F. Energetic use of biogas from the anaerobic digestion of coffee wastewater in southern Minas Gerais, Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2084-2094, 2020.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. 2012. 63f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Núcleo de Tecnologia, 2012.

RUIZ, R. L. **Microbiologia do rúmen e do biodigestor**. In: Microbiologia zootécnica. São Paulo: Roca, 1992, p. 124-167.

SAMPAIO, C. A. P.; NÄÄS, I. A.; SALGADO, D. D. Amônia, gás sulfídrico, metano e monóxido de carbono na produção de suínos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 5, p. 156-164, 2006.

SCHOMMER, V. A.; WENZEL, B. M.; DAROIT, D. J. Anaerobic co-digestion of swine manure and chicken feathers: Effects of manure maturation and microbial pretreatment of feathers on methane production. **Renewable Energy**, v. 152, 1284e1291, 2020.

SILVA, W. T. L.; NOVAES, A. P.; KUROKI, V.; MARTELLI, L. F. A.; MAGNONI JÚNIOR, L. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. **Química Nova**, v. 35, p. 35-40, 2012.

SAWIN, J.L.; BHATTACHARYA, S. C.; GALÂN, E. M.; MCCRONE, A.; MOOMAW, W. R.; SONNTAG-O'BRIEN, V.; SVERRISSON, F.; CHAWLA, K.; MUSOLINO, E.; SKEEN, J.; MARTINOT, E. **Renewables 2012 Global Status Report**. Paris: REN21, 2012. Disponível em: <http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf>.

VERONEZE, M.L.; SCHWANTES, D.; GONÇALVES JUNIOR, A. C.; RICHART, A.; MANFRIN, J.; SCHILLER, A. P.; SCHUBA, T. B. Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 176-184, 2019.

WU, W.; CHENG, L. C.; CHANG, J. S. Environmental life cycle comparisons of pig farming integrated with anaerobic digestion and algae-based wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 264, p. 110-115, 2020.