

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JULIANA PONTES DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE EXTRAÇÃO
SÓLIDO-LÍQUIDO DE CARBONO ORGÂNICO DE CAMA DE AVIÁRIO**

**FRANCISCO BELTRÃO
2025**

JULIANA PONTES DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE EXTRAÇÃO
SÓLIDO-LÍQUIDO DE CARBONO ORGÂNICO DE CAMA DE AVIÁRIO**

**Influence of Temperature on the Solid-Liquid Extraction Process of Organic
Carbon from Poultry Litter**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador(a): Prof.º Dr.º Marcelo Bortoli

**FRANCISCO BELTRÃO
2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JULIANA PONTES DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE EXTRAÇÃO SÓLIDO – LÍQUIDO
DE CARBONO ORGÂNICO DE CAMA DE AVIÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14 de fevereiro de 2025

Marcelo Bortoli
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adir Silvério Cembranel
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

João Vitor Moreschi
Graduado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**FRANCISCO BELTRÃO
2025**

AGRADECIMENTOS

“A jornada de mil quilômetros começa com o primeiro passo.” Esta frase tem sido uma constante lembrança de que cada passo nos aproxima dos nossos sonhos, mesmo nos momentos mais desafiadores.

No início da minha jornada acadêmica, enfrentei dificuldades significativas. A realidade nova e distinta da que eu vivia antes foi difícil de acompanhar, e precisei trancar a faculdade por um período para me adaptar. No entanto, a persistência e o apoio de pessoas importantes ao meu redor me ajudaram a superar essas dificuldades e continuar em frente.

Gostaria de expressar minha gratidão, primeiramente, à minha mãe, por sempre me apoiar em todas as minhas escolhas e mesmo distante se fazer tão presente. Ao meu irmão, por me incentivar a buscar sempre a minha melhor versão e à minha irmã, pelo apoio emocional incondicional. Ao meu pai e à minha madrastra, pelo total suporte físico e emocional que tanto precisei para concluir esta etapa.

Aos meus amigos, que tornaram essa jornada mais leve divertida e suportável, meu profundo agradecimento. E claro que não podia de deixar de agradecer à minha família de coração, Leonardo, Vanderleia, Evani e Irno, que tive a honra de ter, morando em Francisco Beltrão. Eu sempre serei muito grata por tudo o que fizeram por mim e por todo o suporte que me forneceram.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Bortoli, por tornar esta etapa do TCC mais leve e interessante. Sua orientação facilitou as etapas e me fez desejar aprofundar meus conhecimentos e seguir na carreira acadêmica na área de tratamentos de efluentes e energias renováveis.

Decidir voltar a cursar Engenharia Química após quase dois anos com o curso trancado foi uma das realizações mais marcantes durante meu percurso acadêmico. Essa decisão, da qual eu teria me arrependido se não tivesse tomado, foi fundamental para minha trajetória. Momentos marcantes foram abundantes, tanto no âmbito acadêmico, participando de Iniciação Científica, que me fez olhar com novos olhos para a área de pesquisa, quanto nas atividades extracurriculares

com a atlética e a bateria. Participar de jogos, torcer pela nossa atlética e me envolver profundamente com essas atividades fez com que eu me apaixonasse cada vez mais por essa fase da minha vida.

O estágio na multinacional Kellogg Company também foi particularmente significativo para mim, pois me fez perceber que escolhi o curso certo. Descobri um amor tanto pela área de pesquisa quanto pela área industrial.

Ao concluir esta etapa, sinto um misto de alívio e uma leve tristeza por esta fase estar chegando ao fim. No entanto, estou repleta de felicidade e ansiedade pelo que está por vir. Pretendo continuar na área de pesquisa e acadêmica, almejando realizar um mestrado e doutorado.

A todos que fizeram parte dessa jornada, meu sincero e profundo agradecimento. Esta conquista não seria possível sem vocês e por isso, ela é tão minha quanto de todos.

“A vitalidade é demonstrada não apenas pela
persistência, mas pela capacidade de começar de novo.”
F. Scott Fitzgerald

RESUMO

A digestão anaeróbia surge como uma solução promissora para o tratamento da cama de aviário, transformando-a em biogás e digestato. O biogás, uma fonte de energia renovável, pode ser utilizado para reduzir os custos operacionais e o impacto ambiental das granjas. Este trabalho avaliou a influência da temperatura no processo de extração sólido-líquido de carbono orgânico da cama de aviário e seu impacto na produção de biogás. Os experimentos foram realizados no laboratório da UTFPR, campus Francisco Beltrão, com cama composta por maravalha e excretas de aves. Foram testados três tempos de agitação (15, 30 e 45 minutos) a 100 rpm, com proporção cama:água de 1:6,5, em temperaturas de 20 °C e 35 °C, seguidos de 30 minutos de decantação. As análises físico-químicas contemplaram sólidos totais (ST), fixos (SF), voláteis (SV) e nitrogênio amoniacal ($N - NH_3$). O potencial bioquímico de metano (PBM) foi obtido em reatores com inóculo, monitorando-se a produção de biogás pelo deslocamento de líquido selante. Os resultados indicaram maior eficiência na extração de compostos orgânicos voláteis e aumento de $N - NH_3$ a 35 °C. A cama in natura produziu mais biogás e metano (CH_4) do que o sobrenadante, mas com altos níveis de sulfeto de hidrogênio (H_2S), exigindo tratamento. Conclui-se que a temperatura de 35 °C proporciona melhor extração e maior produção de biogás, destacando a importância do tratamento do H_2S para uso seguro da energia gerada.

Palavras-chave: digestão anaeróbia; biogás; potencial bioquímico de metano; metano; sulfeto de hidrogênio.

ABSTRACT

Anaerobic digestion emerges as a promising solution for treating poultry litter, converting it into biogas and digestate. Biogas, a renewable energy source, can help reduce operational costs and the environmental impact of farms. This study evaluated the influence of temperature on the solid-liquid extraction of organic carbon from poultry litter and its impact on biogas production. Experiments were conducted at the UTFPR laboratory, Francisco Beltrão campus, using wood shavings and poultry excreta litter. Three agitation times (15, 30, and 45 minutes) at 100 rpm were tested with a litter-to-water ratio of 1:6.5 at 20°C and 35°C, followed by 30 minutes of settling. Physicochemical analyses included total solids (TS), fixed solids (FS), volatile solids (VS), and ammoniacal nitrogen ($N - NH_3$). The biochemical methane potential (BMP) was assessed in reactors with inoculum, monitoring biogas production via liquid displacement. Results indicated higher efficiency in extracting volatile organic compounds and increased $N - NH_3$ at 35°C. Raw litter produced more biogas and methane (CH_4) than the supernatant but had high hydrogen sulfide (H_2S) levels requiring treatment. It was concluded that 35°C enhances extraction and biogas production, highlighting the importance of H_2S treatment for safe energy use.

Keywords: anaerobic digestion; biogas; biochemical methane potential; methane; hydrogen sulfide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Porcentagem Sobre o Custo Operacional da Produção de Frangos de Corte.....	18
Figura 2: Curva Padrão de Concentração de Nitrogênio.....	33
Figura 3 - Produção Acumulada de Biogás da Cama in Natura.....	38
Figura 4 - Produção Acumulada de Biogás do Sobrenadante.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição Média de Amostras de Cama de Aviário.....	20
Tabela 2 - Planejamento Experimental: Condições de Agitação, Temperatura e Proporção das Amostras.....	25
Tabela 3 - Exemplo de obtenção de curva de calibração.....	28
Tabela 4 - Valores de Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV) para 20 °C.....	31
Tabela 5 - Valores de Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV) para 35 °C.....	31
Tabela 6 - Valores de absorvância das amostras dissolvidas de cloreto de amônio (NH_4Cl).....	32
Tabela 7 - Valores de Absorvância e Concentração de Nitrogênio Amoniacal para 20 °C.....	33
Tabela 8 - Valores de Absorvância e Concentração de Nitrogênio Amoniacal para 35 °C.....	34
Tabela 9 - Níveis de Produção de Biogás ao Longo do Tempo para a Cama in Natura.....	35
Tabela 10 - Níveis de Produção de Biogás ao Longo do Tempo para o Sobrenadante.....	36
Tabela 11 - Concentrações de Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2), Oxigênio (O_2) e Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) na Cama in Natura.....	39
Tabela 12 - Concentrações de Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2), Oxigênio (O_2) e Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) no Sobrenadante.....	39
Tabela 13 - Resultado do PBM (NmLbiogás/gSVadic) para Cama in Natura e Sobrenadante.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
CH	Conventional House
DH	Dark House
g	Gramas
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
mL	Mililitro
MS	Matéria Seca
NTD	Nitrogênio Total Disponível
PBM	Potencial Bioquímico de Metano
ppm	Partes Por Milhão
SF	Sólidos Fixos
SV	Sólidos Voláteis
ST	Sólidos Totais
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Problema	13
1.2	Justificativa	15
2	OBJETIVOS	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1	Panorama da avicultura no Brasil	18
3.2	Resíduos da produção de aves de corte	20
3.3	Cama de aviário	22
3.4	Digestão anaeróbia.....	25
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	28
4.1	Caracterização da cama de aviário.....	28
4.2	Extração da matéria orgânica para a fase líquida	28
4.3	Análises das amostras	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1	Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) E Sólidos Voláteis (SV)	37
5.2	Nitrogênio Amoniacal.....	38
5.3	Potencial Bioquímico do Metano (PBM)	42
6	CONCLUSÃO.....	50
7	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da cadeia produtiva do frango de corte na América do Sul ocorreu a partir da década de 1950, estruturando-se em três grandes fases. A primeira fase começou no Brasil, no período entre os anos de 1950 e 1970. Nesse período, a criação de aves era basicamente uma atividade de subsistência com poucos recursos para se desenvolver e se apresentava como uma atividade agropecuária sem expressão econômica (RODRIGUES et al., 2014).

A partir da década de 70, com o avanço da tecnologia, bem como a chegada de empresas processadoras no mercado e especialistas no processo de produção de frango, a produção avícola se tornou mais efetiva e teve seu aumento no mercado. Transformações tecnológicas, técnicas de produção intensiva e o desenvolvimento de genética adaptada contribuíram para o avanço da atividade (ZEN et al., 2014).

Atualmente, a produção de galináceos é a que mais cresce, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os dados de 2020 indicam um aumento do rebanho de, aproximadamente, 1,49% em comparativo aos de 2019. Conseqüentemente, esse aumento gera uma maior preocupação com a condição de produção. O bem-estar do animal tem estreita ligação com a qualidade do produto final (AMARAL et al., 2011).

Segundo Amaral et al. (2011), um dos fatores que influenciam no bem-estar e na qualidade da carne dos frangos de corte é o ambiente em que são criados. Elementos como temperatura, sistema de criação, instalações da granja, densidade e qualidade da cama fazem parte desse fator. Contudo, gerar essa comodidade acarreta problemas ambientais, tal como o descarte incorreto da cama de aviário (PALHARES, 2017).

Esse material é composto por um elemento absorvente, excretas das aves, penas, restos de alimentos, água e secreções e sua troca é necessária para manter as melhores condições do local (CESAR, 2022). Portanto, pelo seu alto poder biológico, deve-se tratar previamente esse material para que não haja contaminação química e microbiológica do solo e da água, colocando em risco a qualidade de vida da população que vive próximo das granjas e aviários (SGAVIOLI et al., 2015).

De acordo com Souza et al. (2017), ma das alternativas para o tratamento desse resíduo é a digestão anaeróbia. Nela ocorre a degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, através de processos de fermentação e decomposição. A partir da digestão anaeróbia, o resíduo pode ser transformado em biogás e digestato. Esse processo ocorre em quatro fases com microrganismos específicos atuando em cada uma das etapas.

O biogás, um dos subprodutos da digestão anaeróbia, é uma opção de energia renovável que possui um bom rendimento, podendo ser utilizado no próprio aviário (MOREIRA et al., 2010). Além disso, o biogás pode ser utilizado como fonte de renda, agregar valor ao negócio e tornar a atividade um modelo de produção mais sustentável. Ainda, a digestão anaeróbia contribui para a reutilização da cama de aviário e assim diminuindo o impacto que esta pode causar ao meio ambiente (DORNELAS et al., 2017).

Nesse contexto, visando o processo de digestão anaeróbica e a produção de biogás, o presente trabalho propõe avaliar o potencial de geração de biogás da camade aviário com adição de água, determinando a influência da temperatura na extraçõesólido-líquido do carbono orgânico presente e a influência do processo de extração nopotencial de geração de biogás.

1.1 Problema

A cama de aviário está sendo produzida em grande quantidade devido ao crescente aumento da avicultura de corte nos últimos anos no país. Sua composição final pode variar conforme o produtor, mas em geral, os dois elementos presentes em altas concentrações na cama de aviário, mais relacionados com contaminação ambiental, são o nitrogênio e o fósforo (HAHN, 2004). Ambos podem contaminar o solo e as águas superficiais, contudo, o nitrogênio é mais nocivo ao ecossistema, podendo contaminar a atmosfera e as águas subterrâneas.

Ainda, segundo Hahn (2024), a alta concentração de nutrientes, material orgânico e uma constante deposição de excretas dos animais, conferem à cama de aviário características favoráveis à manutenção e desenvolvimento de uma elevada e diversificada população microbiana que podem contaminar o solo, os

mananciais e, infectar o homem e outros animais tanto pelo contato com a pele quanto pelo consumo de água, animais aquáticos e alimentos contaminados.

Além disso, um problema que vem crescendo, cada vez mais, é o consumo de energia. Atualmente, este gera grandes gastos para os produtores de galináceos. É estimado que cerca de 40% dos custos operacionais da produção de frangos de

corte decorrem do fornecimento de energia elétrica e térmica, tanto para climatização quanto para o aquecimento dos aviários (AVICULTURA INDUSTRIAL, 2016).

Os aquecedores mais utilizados também demandam diferentes tipos de fontes de calor, podendo ser a energia elétrica, térmica - com a queima de carvão e/ou lenha

- e gás GLP. Portanto, afetam diretamente no gasto mensal do produtor pela grande demanda de energia, independente da fonte principal, além de gerar problemas ambientais com a emissão de gases poluentes.

1.2 Justificativa

Atualmente, o principal destino para a cama de aviário é o uso como fertilizante do solo. Essa prática, se feita corretamente, seguindo as normativas brasileiras, é desejável economicamente, pois a cama é um recurso bastante usado nas granjas avícolas e possui elevada concentração de nutrientes (TESSARO, 2011; BALDIN, 2013).

Contudo, de acordo com Baldin (2013), os problemas de poluição do solo, da atmosfera e dos recursos hídricos por nutrientes e microrganismos patogênicos, advindos da utilização excessiva da cama de aviário como fertilizante, estão viabilizando o uso energético da cama de aviário.

Para um efeito energético significativo do biogás, a quantidade de metano é de suma importância. Para isso, é importante conhecer a quantidade de substrato e umidade necessária para a produção máxima de metano de uma amostra. Ainda, fatores como pH, agitação, tempo de retenção e temperatura também são significativos para um melhor resultado.

Nesse sentido, para uma extração efetiva do biogás da matéria orgânica de cama de aviário, se faz necessária a adição de água no substrato, devido à baixa concentração de umidade presente no meio. Com isso, a extração do sólido-líquido, torna-se mais eficiente na otimização da produção de metano e conseqüentemente, aumenta a quantidade e qualidade do biogás produzido.

Além disso, para se otimizar esse processo de extração, a temperatura do meio também é de suma importância. Os tanques de digestão anaeróbia

funcionam com maior eficiência com temperatura entre 28°C e 35°C pois influencia positivamente na velocidade de crescimento e metabolismo dos microrganismos. Essa eficiência tem relação direta com a quantidade de biogás produzido.

Diante disso, o biogás gera calor residual nos motores a combustão utilizados na sua queima e assim, gera eletricidade (BALDIN, 2013). Essa eletricidade pode ser reutilizada nos aviários, originando uma diminuição dos gastos dos produtores.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da temperatura no processo de extração da matéria orgânica de cama de aviário em água, analisando a influência desse processo no potencial de geração de biogás das frações sólida e líquida.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a cama de aviário utilizada por meio da identificação de pH, sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF), sólidos voláteis (SV) e Nitrogênio Amoniacal;
- Avaliar o efeito da temperatura no processo de extração do carbono orgânico em duas temperaturas (20°C e 35°C);
- Avaliar a influência desse processo na volatilização de NH₃;
- Medir o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) das diferentes frações sólida e líquida obtidas.
- Realizar balanço de massa e energia para verificar a eficiência energética do processo de extração com e sem elevação da temperatura.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Panorama da avicultura no Brasil

A avicultura brasileira vem crescendo em produção e destaca-se no mercado internacional de carnes. Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2021), o Brasil ocupa, desde 2011, a terceira posição em produção mundial desse produto, atrás somente dos Estados Unidos e China. Em 2021, a produção brasileira atingiu cerca de 14,6 milhões de toneladas e estima-se o crescimento de 2% em 2022.

Além do mais, em 2011, o Brasil também conquistou a liderança na exportação de carne de frango. Atualmente, ele é seguido pelos Estados Unidos, União Europeia, Tailândia e Turquia (USDA, 2021).

Surtos recentes de influenza aviária e o surto de peste suína africana (PSA) na China, em 2018, e sua disseminação para outras partes do mundo, gerou déficits na produção de proteína animal em muitos mercados. Como o Brasil não foi afetado diretamente por essas crises, aumentou a demanda e as oportunidades para a avicultura brasileira (AVICULTURA INDUSTRIAL, 2022).

Graças ao aumento dessa demanda, os preceitos defendidos pela teoria do bem-estar animal estão cada vez mais presentes na produção. Evitar estresse, sofrimento e maus tratos, garantir conforto térmico, alimentação de qualidade e saúde, desde o nascimento até o abate, são princípios fundamentais para garantir maior produtividade e qualidade do produto (MENDES, 2017). O conforto térmico se dá através da estrutura do galpão, podendo ele ser escuro (Dark-House – DH) ou com cortinas de polipropileno (Conventional House - CH), e, pelo uso da cama de aviário.

Na maioria dos países tropicais, os aviários são construídos de maneira convencional (CH), os quais não possuem laterais estruturais e por isso são fechados com cortinas de polipropileno. Os galpões são equipados com ventiladores e sistemas de nebulização, o qual fornece ventilação de alta velocidade no túnel proporcionando uma boa circulação do ar e retirada de grande parte do calor gerado no interior do local, proporcionando um bom ambiente térmico para os animais (GARCIA et al., 2019).

Já algumas granjas, segundo Garcia et al. (2019), criam frangos em

galpões escuros (DH). Eles são completamente fechados, possuem temperatura e umidade controladas através de sistemas de ventilação de pressão negativa (ventiladores exaustores) e placas de resfriamento.

Ao controlar a temperatura e a umidade relativa dentro dos galpões, o ambiente de criação se torna mais adequado (PURSWELL et al., 2014) e com isso, os criadores de frangos de corte podem manter melhor a uniformidade do lote. A ventilação adequada dentro do ambiente favorece uma melhor qualidade do ar e a qualidade adequada da cama (GARCÊS et al., 2013; TAIRA et al., 2014; LIMA et al., 2015).

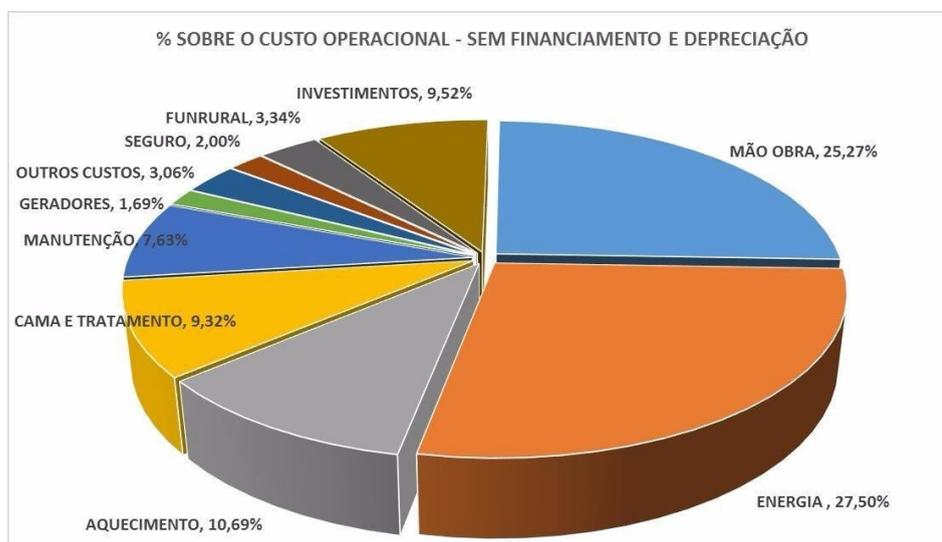
Contudo, o controle desses fatores influencia, diretamente, na demanda energética da atividade de criação dos frangos de corte. Juntando-se a isso, a atividade avícola requer, também, a utilização intensiva de tecnologias, o que implica em um grande consumo de energia nos processos até se obter o produto final (BALDIN, 2013).

3.1.1 Perfil energético dos aviários de frango de corte

Segundo Baldin (2013), os gastos de energia nos aviários representam impacto significativo na avicultura e estão diretamente relacionados com a climatização (aquecimento e ventilação) dos galpões.

Segundo a revista *Avicultura industrial* (2016), os gastos com climatização e aquecimento representam, respectivamente, 27,5% e 10,69% dos custos totais de produção do frango para o avicultor (Figura 1). O clima temperado e as variações climáticas do país potencializam o consumo elevado de energia.

Figura 1: Porcentagem Sobre o Custo Operacional da Produção de Frangos de Corte



Fonte: *Avicultura Industrial (2016)*

Todavia, tem de se levar em conta o tipo de galpão utilizado na granja. Galpões do tipo *Dark House* necessitam de uma quantidade maior de energia por serem mais automatizados. Conforme Nascimento (2011), o consumo de energia em aviários varia em função do grau de automação dos sistemas de controle e manejo (sistemas de ventilação, aquecimento, fornecimento de água e alimento, entre outros).

No Brasil, a avicultura local é composta por um número considerável de pequenas e médias empresas, porém o consumo energético continua sendo alto e um problema a ser solucionado (BALDIN, 2013).

3.2 Resíduos da produção de aves de corte

A cadeia de produção avícola, dentre os setores pecuários, constitui-se do maior índice de industrialização no país. As questões ambientais relacionadas a essa atividade tomam uma importância ainda maior, devido à grande escala de produção e aos vários atores desta cadeia exigirem um desenvolvimento produtivo com qualidade nutricional e ambiental (CESAR, 2022).

Ainda, de acordo com o Cesar (2022), a produção aviária gera vários resíduos como poeira, odor, água de lavagem, carcaças de aves e a cama. A cama é constituída por um material absorvente, que pode ser maravalha,

serragem, sabugo de milho triturado, capins e restos de culturas. Além disso, penas, excretas das aves, restos de alimento e secreções também são encontrados nesse material.

Por conter um alto poder biológico, é necessário que se conheça a composição desse material, para que o seu manejo e descarte ocorra corretamente e com maior precisão. Para isso, através do estudo feito por Botega (2019), pode-se concluir que a cama possui vários nutrientes, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Composição Média de Amostras de Cama de Aviário.

Parâmetro	Unidade	Valor Médio
Umidade	%	25,37
Cinzas	%	19,16
Carbono Orgânico Total (COT)	%	30,45
Nitrogênio Total	%	2,43
Relação C/N	-	12,53
Fósforo	%	1,10
Potássio	%	1,92
Cálcio	%	3,71
Magnésio	%	0,55
Sódio	%	0,49

Fonte: Botega (2019)

Ademais, com o aumento da produção, faz-se necessária a troca periódica da cama de frango, aumentando, ainda mais, a quantidade de resíduos advindos da cultura aviária. Segundo Mitchell Junior et al. (1991), a produção de cama de seis lotes de um ano, ficou em média de 2,0 toneladas para cada mil aves.

3.3 Cama de aviário

3.3.1 Aproveitamento da cama

Por causa do alto potencial biogênico da cama de aviário, não é aconselhado o uso direto no solo sem um tratamento prévio. A cama pode ser reaproveitada como fonte de nutrientes para as culturas vegetais após sofrer uma compostagem ou digestão anaeróbia. Em ambos os processos, ocorre a geração de produtos que devem ser aproveitados a fim de viabilizar ambientalmente e economicamente a criação (CESAR, 2022; OLIVEIRA et al., 2014).

A compostagem é um processo biológico aeróbio que transforma resíduos orgânicos em composto, por meio da ação de microrganismos, resultando em um material rico em nutrientes que pode ser utilizado como fertilizante natural (SILVA et al., 2020). Esse processo reduz significativamente a carga patogênica da cama, além de minimizar odores e estabilizar os nutrientes presentes no material.

A digestão anaeróbia, por sua vez, é um processo biológico realizado na ausência de oxigênio, no qual microrganismos degradam a matéria orgânica, gerando biogás e biofertilizante (BORTOLINI et al., 2019). O biogás produzido é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), sendo uma fonte renovável de energia utilizada para iluminação, aquecimento e movimentação de equipamentos e máquinas (PERSZEL, 2018h). O biofertilizante gerado é um subproduto líquido rico em nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, que pode ser aplicado no solo para melhorar a fertilidade e aumentar a produtividade das culturas (GOMIDE; CRUZ, 2014).

Estudos indicam que o aproveitamento da cama de aviário por meio da compostagem ou digestão anaeróbia pode reduzir o impacto ambiental da atividade avícola, mitigando as emissões de gases de efeito estufa e evitando a contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas (HAHN, 2004; WANG et al., 2017). Além disso, a utilização do composto e do biofertilizante na agricultura contribui para a economia circular, promovendo a sustentabilidade ambiental e econômica da produção de aves (SGAVIOLI et al., 2015).

De acordo com Cesar (2022) e Oliveira et al. (2014), os produtos gerados

são o composto e o biofertilizante, os quais são utilizados como fonte de nutrientes para as culturas e, além disso, existe a geração de biogás, no processo de fermentação, o qual é utilizado como fonte de energia térmica para iluminação, aquecimento e movimentação de equipamentos e máquinas.

3.3.2 Uso incorreto da cama

Além do biogás, são gerados gases - como amônia, o dióxido de carbono e metano - e odores advindos da degradação dos dejetos e que causam impactos ambientais. A emissão desses gases de atividade pode ter implicações na produção, saúde humana e meio ambiente. O manejo incorreto das instalações e dos dejetos poderá aumentar substancialmente a emissão desses gases (AUGUSTO, K.V.Z.; KUNZ, A., s.d.; BORTOLINI, 2019).

De acordo com Augusto e Kunz (s.d.) e Bortolini (2019), o uso não controlado da cama como fertilizante traz sérias consequências ao meio ambiente, como a fertilização excessiva do solo em função do alto teor de nutrientes, como o fósforo e nitrogênio, resultando em contaminação do solo, propriamente dito, da atmosfera e de águas superficiais e subterrâneas.

Além disso, estudos apontam que o manejo inadequado da cama de aviário pode causar a eutrofização de corpos d'água devido ao excesso de nutrientes, especialmente o fósforo, que é transportado pela lixiviação ou escoamento superficial (SILVA et al., 2020). A eutrofização pode provocar a proliferação de algas e a diminuição da oxigenação da água, afetando diretamente a biodiversidade aquática (GOMIDE; CRUZ, 2014).

Outro aspecto negativo do uso incorreto da cama de aviário é a emissão de gases de efeito estufa, como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), que contribuem para o aquecimento global. Segundo Wang et al. (2017), a disposição direta da cama em grandes quantidades sem tratamento adequado pode acelerar o processo de decomposição anaeróbia e, conseqüentemente, aumentar a emissão desses gases para a atmosfera.

A presença de microrganismos patogênicos na cama de aviário também é uma preocupação ambiental e de saúde pública. Quando a cama é aplicada sem tratamento térmico ou biológico prévio, há risco de contaminação do solo e

da água por agentes como *Salmonella* spp. e *Escherichia coli* (HAHN, 2004).

Portanto, o tratamento adequado da cama de aviário, como a compostagem e a digestão anaeróbia, é fundamental para minimizar seus impactos ambientais. Esses processos ajudam a estabilizar a matéria orgânica, reduzir a carga de microrganismos patogênicos e melhorar a qualidade do fertilizante final, tornando o uso agrícola mais seguro e sustentável (BORTOLINI et al., 2019; SGAVIOLI et al., 2015).

3.3.3 Fermentação da cama

Atualmente o principal destino para a cama de aviário é o uso como fertilizante do solo. Essa prática, se feita corretamente, seguindo as normativas brasileiras, é desejável economicamente, pois a cama é um recurso bastante usado nas granjas avícolas e possui elevada concentração de nutrientes (TESSARO, 2011; BALDIN, 2013).

Contudo, de acordo com Gomide, P. H. O., & Cruz, J. C. (2014), a aplicação excessiva de cama de aviário como adubo pode resultar em sérios problemas ambientais, como a lixiviação de nutrientes e a contaminação por patógenos. Eles sugerem que a utilização dessa cama como fonte de energia pode ser uma solução viável para mitigar esses impactos.

Para isso, segundo Baldin (2013), o processo de fermentação é o responsável pela geração do biogás e conseqüentemente a geração de energia. Esse processo ocorre quando a cama apresenta alto teor de umidade, seja em virtude de períodos chuvosos, utilização do sistema de nebulização, pelas excretas e até mesmo pelo consumo da água pelas aves. A umidade favorece condições necessárias para a proliferação dos microrganismos, mesmo estando dentro do aviário e havendo aves alojadas nele.

Segundo Tessaro (2011), no período em que a cama se encontra no aviário, ela sofre uma lenta decomposição anaeróbica. Para os avicultores essa decomposição é conhecida como fermentação e é perceptível pela liberação do gás amônia.

Neste processo, a cama de aviário sofre alterações físicas, químicas e biológicas pelas inúmeras transformações desencadeadas pelos microrganismos. (BALDIN, 2013).

3.4 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo de decomposição de matéria orgânica por bactérias em um meio onde não há a presença de oxigênio gasoso. Esse processo é recomendado como tratamento biológico primário de resíduos orgânicos que são degradados por um grupo de microrganismos específicos, com destaque para as Archaeas metanogênicas, responsável pela produção de metano.

Os processos anaeróbios se fazem viáveis no setor de tratamento de efluentes devido às suas vantagens. Baixa energia requerida, fácil operação dos reatores, baixa produção de lodo, produção de biogás/biometano e a geração de biofertilizantes são bons exemplos disso (WANG et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018; DE MENDONÇA et al., 2021).

No processo anaeróbio, há bactérias que utilizam os componentes químicos, tais como dióxido de carbono (CO_2), nitratos (NO_3^-) e sulfatos (SO_4^{2-}) para a obtenção do produto da oxidação da matéria orgânica. Tal processo é composto por dois estágios.

No primeiro, atuam as bactérias anaeróbias e facultativas, bactérias que transformam compostos orgânicos de carboidratos, lipídios e proteínas em ácidos voláteis. Nesse processo há a presença de liquefação e fermentação ácida e acetogênica (COSTA, 2006).

No segundo, atuam as bactérias estritamente anaeróbicas que convertem os ácidos voláteis em gases como o metano e o gás carbônico (metanogênese) (SILVA, 2009; COSTA, 2006; BALDIN, 2013).

Os processos de digestão anaeróbia para a geração de biogás, como forma de obtenção de energia, podem ser divididos por biodigestores em batelada e biodigestores contínuos.

Para que o processo de digestão anaeróbia ocorra com maior eficiência, há condições a serem observadas, tais como pH, temperatura, agitação, tempo de retenção, quantidade de água e concentração dos nutrientes (BGS

EQUIPAMENTOS, 2018).

Recomenda-se que o pH - potencial hidrogeniônico dos substratos se mantenha em valores entre 6,6 e 7,4, pois a atividade das bactérias são melhores nessa faixa. Além disso, os tanques de digestão anaeróbia funcionam com maior eficiência com temperatura entre 28 °C e 35 °C. Essa temperatura pode ser fornecida por trocadores de calor que têm como fonte de energia térmica a radiação solar, ou o calor residual dos motores a combustão utilizados para queimar esse biogás e gerar eletricidade (BGS EQUIPAMENTOS, 2018; BALDIN, 2013).

Ademais, segundo os autores, a agitação é responsável por fazer com que as bactérias se encontrem em todo o substrato e produza o biogás de maneira contínua. Recomenda-se, em linhas gerais, um tempo de agitação de 10 a 15 minutos. Já o tempo de retenção é responsável por fazer com que as bactérias tenham tempo suficiente para realizem a degradação da matéria e isso pode variar, conforme a quantidade de material.

Já o excesso de água reduz a qualidade dos dejetos e conseqüentemente a produção de biogás. Recomenda-se 3L de água para cada quilo de substrato. A relação ideal entre carbono e nitrogênio dos dejetos antes da entrada no biodigestor é de 20:1 a 30:1 e a concentração inicial dos outros nutrientes deve ser próxima de 3,1 g/L de nitrogênio, 2,3 g/L de fósforo e 1,9 g/L de potássio (BGS EQUIPAMENTOS, 2018).

3.5 Influência da Temperatura na Digestão Anaeróbia

A temperatura é um dos fatores de grande importância para o bom funcionamento do processo de digestão anaeróbia, pois afeta diretamente a atividade microbológica, a velocidade de degradação da matéria orgânica e a eficiência na produção de biogás (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

O processo de digestão anaeróbia pode ocorrer em três faixas de temperatura: psicrófila (abaixo de 25°C), mesófila (entre 25°C e 40°C) e termófila (entre 45°C e 60°C). A faixa mesófila é a mais utilizada em sistemas de biodigestão, pois apresenta maior estabilidade microbológica e requer menos controle energético, além de resultar em uma produção eficiente de biogás

(WANG et al., 2017).

Segundo Li et al. (2018), a digestão em temperaturas termófilas apresenta uma maior taxa de degradação da matéria orgânica e redução mais significativa de patógenos, porém exige maior controle operacional e consumo energético, o que pode inviabilizar economicamente o processo em pequenas propriedades.

A manutenção adequada da temperatura durante o processo é essencial para garantir a atividade das bactérias metanogênicas, responsáveis pela conversão de ácidos orgânicos em metano. Flutuações bruscas de temperatura podem afetar negativamente a eficiência do processo, causando acúmulo de ácidos voláteis e redução na produção de biogás (ZHANG et al., 2019).

Estudos indicam que o aumento da temperatura na digestão anaeróbia pode melhorar a solubilização da matéria orgânica, acelerando a fase hidrolítica e, conseqüentemente, aumentando a geração de biogás (PERSZEL, 2020). Entretanto, o equilíbrio entre temperatura, tempo de retenção e carga orgânica deve ser observado para evitar a inibição do processo por excesso de ácidos voláteis (WANG et al., 2017).

Portanto, a escolha da faixa de temperatura deve levar em consideração as condições operacionais, a disponibilidade de recursos energéticos e a necessidade de controle microbiológico para garantir a máxima eficiência da digestão anaeróbia.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para avaliar a influência da temperatura na extração sólido-líquido da cama de aviário e conseqüentemente no potencial de geração de biogás de cada uma das frações, foram realizados experimentos de extração sólido-líquido em bateladas, em escala de laboratório.

Tanto os experimentos como as análises foram realizadas nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus de Francisco Beltrão – Paraná.

4.1 Caracterização da cama de aviário

Para os experimentos, foi utilizada cama de aviário proveniente de criação de frangos, composta por uma mistura de maravalha e excretas das aves. A amostra foi coletada em um aviário localizado no município de Francisco Beltrão, Paraná. A coleta consistiu em 2 kg de cama de aviário, que foi imediatamente armazenada em freezer para preservação até o momento da utilização. Antes de ser utilizada nas análises, a amostra foi descongelada e tratada conforme o protocolo experimental.

Em relação ao manejo da cama de aviário, não foi possível determinar o número de lotes alojados na cama coletada, nem o período de permanência de cada lote, devido à limitação de dados disponíveis. Contudo, a cama utilizada nas análises foi caracterizada conforme as condições encontradas na amostra coletada. A base de cama era composta predominantemente de maravalha, o que contribuiu para a composição do material a ser analisado.

4.2 Extração da matéria orgânica para a fase líquida

O experimento consistiu em ensaios em bateladas de extração do sólido-líquido com agitação em diferentes temperaturas. A agitação foi realizada pelo agitador mecânico de alto torque microprocessado, marca Quimis e modelo Q250M1.

Inicialmente, foi utilizado a velocidade da amostra que melhor apresentou resultados em comparação a três diferentes agitações, sendo elas 100, 200 e 300 rpm. Sendo assim, a velocidade de agitação foi fixada em 100 rpm.

Além disso, Perszel, (2018) verificou que intervalos curtos de tempo, não apresentaram grande interferência na extração da matéria orgânica. Logo, as amostras foram avaliadas em três diferentes tempos de agitação, sendo eles 15, 30 e 45 minutos.

Ademais, com a agitação fixa e nos tempos definidos, as amostras foram avaliadas em duas temperaturas diferentes, sendo uma a 20 °C e outra a 35 °C.

Ainda, foi necessária a escolha da proporção de água e cama de aviário. Segundo AIRES (2009), amostras com diferentes proporções diluíram a mesma quantidade de sólidos totais. Sendo assim, seguindo esta referência, foi utilizada a proporção de 1 quilograma de cama para cada 6,5 litros de água (1:6,5) garantindo uma proporção adequada entre sólidos totais e economia de água na diluição. (PERSZEL, 2020). Foi utilizada, também, a cama in natura, ou seja, sem a adição de água.

Com base em todos os dados fornecidos anteriormente, as amostras foram agitadas, em uma velocidade fixa, 100 rpm, primeiramente a 20°C e, posteriormente, a 35 °C, ambas por 15, 30 e 45 minutos. Logo após a agitação, elas foram deixadas em descanso durante 30 minutos, a fim de que ocorresse a decantação e se formasse duas fases: líquida (sobrenadante) e sólida. Para melhor organização e visualização dos parâmetros utilizados, a Tabela 2 apresenta um resumo das condições experimentais adotadas.

Tabela 2 - Planejamento Experimental: Condições de Agitação, Temperatura e Proporção das Amostras

Fase	Temperatura (°C)	Tempo de Agitação (min)	Velocidade de Agitação (rpm)	Proporção Cama:Água (g:g)	Tempo de Decantação (min)
Cama <i>in Natura</i>	20	0	100	310:0	0
Líquida	20	15	100	310:1690	30
Líquida	20	30	100	310:1690	30
Líquida	20	45	100	310:1690	30
Líquida	35	15	100	310:1690	30
Líquida	35	30	100	310:1690	30
Líquida	35	45	100	310:1690	30
Sólida	20	15	100	310:1690	30
Sólida	20	30	100	310:1690	30
Sólida	20	45	100	310:1690	30
Sólida	35	15	100	310:1690	30
Sólida	35	30	100	310:1690	30
Sólida	35	45	100	310:1690	30

Foram utilizados diferentes tempos de agitação com o intuito de se analisar o mais significativo, em relação à transferência de sólidos voláteis da fase sólida para a líquida. Esse teste inicial foi de extrema relevância devido ao fator de determinação de sólidos voláteis nas amostras, os quais caracterizaram a matéria biodegradável das mesmas. Quanto maior a quantidade de matéria biodegradável presente, maior será a potencial produção de biogás. (WEF, 2017; OLIVEIRA et al., 2014).

A transferência de sólidos voláteis da fase sólida para a fase líquida é fundamental para a digestão anaeróbia, de acordo com a *Water Environment Federation* (WEF, 2017) e Oliveira et al. (2014). Isso ocorre porque determina a quantidade de matéria orgânica disponível para a produção de biogás. Estudos mostram que a quantidade de matéria biodegradável no substrato aumenta a produção de biogás.

4.3 Análises das amostras

Os parâmetros físico-químicos analisados foram pH, sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF), sólidos voláteis (SV) e Nitrogênio Amoniacal, com o objetivo de caracterizar a composição das frações sólida e líquida da cama de aviário após o processo de extração.

Além dessas análises, as amostras de biogás obtidas durante os ensaios cinéticos foram analisadas para determinar as concentrações de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), a fim de avaliar a qualidade do biogás gerado e sua viabilidade para uso energético.

4.3.1 Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) E Sólidos Voláteis (SV)

As análises das amostras ocorreram de acordo com as do *Standard Methods* (APHA, 2012). Após a definição de temperatura, agitação e descanso das amostras, foram coletados 100 mL do sobrenadante e 20 g da fase sólida de cada vaso.

Para a cama *in natura*, foram coletados 30 g e em seguida, dispostos em cápsulas de porcelana. As cápsulas foram inseridas para secagem em uma estufa a 70 °C, por no mínimo 18 horas. Após esse período, foi aumentada a temperatura da estufa para 110 °C por mais 3 horas. Esse processo decorreu a fim de evitar perda de amostra caso ocorresse fervura e borbulhamento. Em seguida, ocorreu a retirada da estufa e a inserção em dessecadores para resfriamento. Após resfriadas, foram pesadas a fim de obter os valores de Sólidos Totais (ST).

Posteriormente, foram calcinadas em mufla, a 510 °C, durante 1 hora, e inseridas em dessecador até seu resfriamento e pesadas para obtenção dos valores de Sólidos Fixos (SF). O resultado dos Sólidos Voláteis (SV) é calculado através da diferença entre os sólidos totais e sólidos fixos.

A concentração dos sólidos totais foi determinada pelas equações (1) e (2):

$$ST [g] = P1 - (P2 - P3) \quad (1)$$

Onde:

P1= quantidade de amostra inserida na cápsula,

em g; P2 = massa da cápsula + amostra, em g;

P3 = massa da cápsula + amostra após a estufa, em g.

$$ST [g/kg] = ST \times 1000 / P1 \quad (2)$$

Onde:

ST = valor de Sólidos Totais, em g;

P1= quantidade de amostra inserida na cápsula, em g;

A quantidade de sólidos fixos foi determinada pelas equações (3) e (4):

$$SF (g) = ST - (P3 - P4) \quad (3)$$

Onde:

ST = valor de Sólidos Totais

P3 = massa da cápsula + amostra após a estufa,

em g. P4 = massa da cápsula + resíduo após

mufla, em g;

$$SF [g/kg] = SF \times 1000 / P1 \quad (4)$$

Onde:

SF = valor de Sólidos Totais, em g;

P1= quantidade de amostra inserida na cápsula, em g;

Para expressar Sólidos Voláteis, em g/kg, foi utilizado a equação (5):

$$SV [g/kg] = SV \times 1000 P1 \quad (5)$$

Onde:

SV = valor de Sólidos Totais, em g;

P1= quantidade de amostra inserida na cápsula, em g.

4.3.2 Nitrogênio Amoniacal

As análises das amostras ocorreram de acordo com o do *Standard Methods* (APHA, 1998).

Foram utilizadas as mesmas amostras descritas na Tabela 2, abrangendo as três fases avaliadas: sólida, líquida e in natura, nas condições experimentais previamente estabelecidas, incluindo diferentes temperaturas (20 °C e 35 °C) e tempos de agitação. Todas as amostras foram tamponadas em pH 9,5 com tampão de borato para reduzir a hidrólise de cianatos e compostos orgânicos de nitrogênio, a fim de permitir a evolução total de amônia durante a destilação. Em seguida, o destilado foi recolhido em ácido bórico para posterior quantificação.

A determinação da concentração de amônia no destilado ocorreu por análise espectrofotométrica, após o período de reação. Foram coletados 1000 mL de amostra em frascos de vidro, preservados em ácido sulfúrico até pH < 2,0 por até 7 dias sob refrigeração a 4 °C.

Foram utilizados para o ensaio, medidor de pH, espectrofotômetro (420 nm), conjunto para destilação de nitrogênio para tubo micro/macro, além das vidrarias e reagentes necessários.

As soluções padrões de cloreto de amônio (NH_4Cl) foram preparadas para a obtenção da curva de calibração, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Exemplo de obtenção de curva de calibração

Concentração de Nitrogênio Amoniacal ($N - NH_3$)(mg/L)	Volume da solução padrão a completar para 100 ml de água destilada	Absorbância
0,0	0,0	X*
0,3	3,0	X*
0,5	5,0	X*
1,0	10,0	X*
5,0	50,0	X*
8,0	80,0	X*
10,0	100,0	X*

X* a obter no equipamento

Fonte: Autoria Própria (2022)

Caso a concentração amônia na amostra a ser analisada fosse maior do que 10 mg/L, deveria ser feita a diluição prévia.

Foram colocados 100 ml da amostra no tubo macro contendo 3 pérolas de vidro e ajustado o pH da amostra para 7,0, utilizando soluções básica ($NaOH$) ou ácida (H_2SO_4), conforme o pH inicial da amostra. Se necessário, o cloro foi removido.

Foram adicionados 50 mL de tampão de borato e ajustado o pH para 9,5 +/- 0,1. O tubo de digestão/destilação foi acoplado ao conjunto de destilação de nitrogênio, onde foi feita a destilação, recebendo o destilado em um erlenmeyer de 250 mL, contendo 50 mL da solução de ácido bórico. A temperatura do condensador do conjunto não ultrapassou 29 °C.

A ponta do condensador estava imersa na solução de ácido bórico para evitar a perda de amônia. A destilação foi interrompida quando faltaram aproximadamente 10 mL para completar o volume de 250 mL. O destilado foi transferido para um balão volumétrico de 250 ml e o volume foi completado com água destilada. O balão foi agitado, foram retirados 50 mL, neutralizado o pH e adicionados 10 mL do reagente Nessler. Após 30 minutos, foi feita a leitura no espectrofotômetro em 420 nm. A leitura foi direta em (mgN/L em NH_3).

4.3.3 Potencial Bioquímico do Metano (PBM)

Para análise do potencial bioquímico de metano, uma batelada de reatores em triplicata foi preenchida somente com o inóculo (teste em branco), outra batelada com celulose microcristalina e inóculo (controle positivo), e os demais reatores com os substratos provenientes dos testes de extração e inóculo. O inóculo foi previamente peneirado em peneira de malha de 2 mm, para remoção dos sólidos mais grosseiros. Foram pesadas, em balança analítica, dentro do frasco reator, as quantias de inóculo e substrato necessárias. O pH da mistura foi determinado. O frasco reator foi purgado com gás nitrogênio por aproximadamente 40 segundos.

Posteriormente, os frascos reatores foram acomodados em recipiente para banho e, com auxílio de silicone e de presilhas, foi vedada a conexão entre o frasco reator e o tubo eudiômetro. O banho foi preenchido com água até cobrir o nível de conexão entre o frasco reator e o eudiômetro, a temperatura foi mantida, inicialmente, a 20 °C e posteriormente a 35 °C. Com uma mangueira específica para gás, o tubo eudiômetro foi conectado ao frasco de solução selante. O aquecedor e agitador foram inseridos e ligados dentro do banho.

Após instalado todo o aparato experimental, o eudiômetro foi purgado pela saída de gás com nitrogênio gasoso, para garantir condições de anaerobiose. Os volumes foram equalizados em três níveis diferentes para cada eudiômetro, colocando o nível do reator de solução selante ao nível da solução selante dentro do eudiômetro, e os volumes equalizados foram anotados. Por fim, as saídas de gás foram fechadas e o volume inicial foi anotado.

A produção de biogás nos testes cinéticos foi monitorada por meio do deslocamento de líquido selante ao longo do tubo eudiômetro. O líquido selante utilizado era composto por sulfato de sódio decahidratado ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e alaranjado de metila ($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$), conforme descrito na norma DIN 38414-8 (DIN, 1985).

As leituras de produção de gás pelo deslocamento da solução selante foram feitas no mínimo uma vez ao dia. A cada leitura, foram anotadas informações referentes ao volume de gás produzido, dia, hora, temperatura ambiente, pressão ambiente e temperatura do banho. Ao final do teste, o gás foi coletado e analisado e o pH do conteúdo do frasco reator foi determinado.

A norma VDI 4630 estabelece que o limite mínimo de recuperação de biogás seja equivalente a 80% ($600 \text{ NmL gSVsubstrato}^{-1}$). Além disso, a produção de biogás é considerada estabilizada quando o valor diário da produção corresponde a 1% ou menos do volume total acumulado, indicando o término da atividade biológica do substrato (VDI, 2016).

O volume de biogás produzido foi expresso como volume de gás seco, em condições padrão de 273,15 K e 101,33 kPa, por massa de sólidos voláteis adicionada, com a unidade de $\text{LNCH}_4\text{kg SV}^{-1}$ (litros normais de metano por quilogramas de sólidos voláteis adicionados).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) E Sólidos Voláteis (SV)

Os valores obtidos das análises realizadas para determinar a concentração de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) nas amostras da cama de aviário *in natura*, dos sobrenadantes (fase líquida) e da fase sólida, após os três tempos de agitação e decantação, a 20 °C e 35 °C, estão apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Valores de Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV) para 20 °C

Amostra	Fase	ST (g)	SF (g)	SV (g)
Cama <i>in natura</i>	Sólida	23,07	11,00	12,07
Amostra 1	Sólida	5,69	2,17	3,52
	Líquida	2,86	1,23	1,63
Amostra 2	Sólida	6,55	2,85	3,70
	Líquida	3,40	1,37	2,03
Amostra 3	Sólida	5,89	2,21	3,68
	Líquida	3,67	1,44	2,23

ST - Sólidos Totais; SF – Sólidos Fixos; SV – Sólidos Voláteis; Amostra 1 – Tempo de agitação de 15 minutos; Amostra 2 – Tempo de agitação de 30 minutos; Amostra 3 – Tempo de agitação de 45 minutos.

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 5 - Valores de Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV) para 35 °C

Amostra	Fase	ST (g)	SF (g)	SV (g)
Cama <i>in natura</i>	Sólida	23,07	11,00	12,07
Amostra 1	Sólida	6,18	2,30	3,88
	Líquida	3,47	1,35	2,12
Amostra 2	Sólida	7,10	2,98	4,12
	Líquida	3,97	1,55	2,42
Amostra 3	Sólida	6,43	2,52	3,91
	Líquida	4,09	1,63	2,46

ST - Sólidos Totais; SF – Sólidos Fixos; SV – Sólidos Voláteis; Amostra 1 – Tempo de agitação de 15 minutos; Amostra 2 – Tempo de agitação de 30 minutos; Amostra 3 – Tempo de agitação de 45 minutos.

Fonte: Autoria Própria (2024)

Os resultados obtidos da análise de Sólidos Totais, Sólidos Fixos e Sólidos Voláteis contidas nas amostragens de cama de aviário possibilitaram

respostas acerca da composição de matéria orgânica existente e da eficiência de extração após manipulação dos fatores pré-determinados. Nas duas temperaturas, tanto a 20 °C quanto a 35 °C, as concentrações de ST, SF e SV na fase sólida foram maiores que nas fases líquidas. Isso se justifica pela maioria dos componentes da cama de aviário serem sólidos e mesmo após o processo de agitação e decantação, tais materiais permanecem na fase sólida. Esses resultados corroboram com a literatura, que indica que compostos sólidos orgânicos, como os presentes na cama de aviário, geralmente permanecem mais concentrados na fase sólida após os processos de agitação e separação (Li et al., 2018; Lee et al., 2020).

A análise dos dados feita para a temperatura de 35 °C mostra um aumento nas concentrações de Sólidos Totais e Sólidos Voláteis em comparação com as amostras analisadas a 20 °C. Este aumento pode ser justificado pelo fato de ocorrer uma maior eficiência na extração de compostos orgânicos voláteis em temperaturas mais elevadas, permitindo uma melhor transferência destes compostos da fase sólida para à fase líquida. Estudos de Liao et al. (2016) e Zhang et al. (2019) indicam que temperaturas mais altas favorecem a liberação de compostos voláteis, o que explica o aumento nas concentrações de SV nas amostras analisadas a 35 °C.

5.2 Nitrogênio Amoniacal

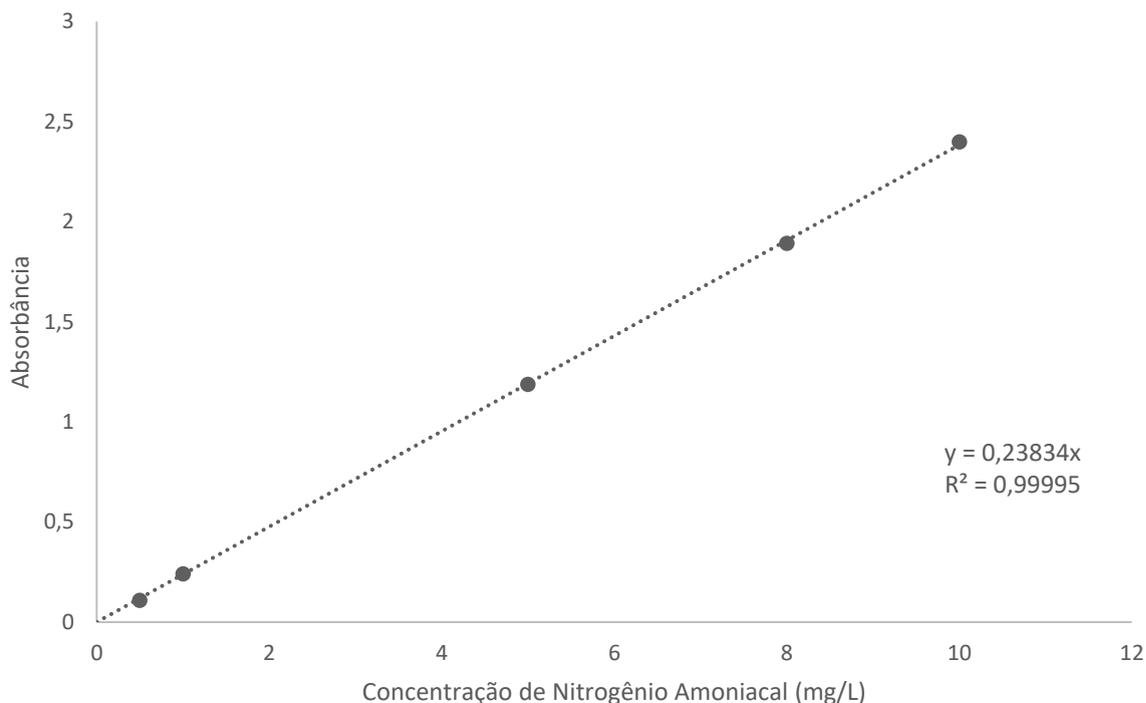
Os resultados dos valores de absorvâncias das amostras dissolvidas, utilizando a solução padrão de cloreto de amônio (NH_4Cl), obtidos conforme a Tabela 2, estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de absorvância das amostras dissolvidas de cloreto de amônio (NH_4Cl)

Concentração de Nitrogênio Amoniacal ($N - NH_3$)(mg/L)	Volume da solução padrão a completar para 100 ml de água destilada	Absorvância
0,0	0,0	0
0,3	3,0	0,064
0,5	5,0	0,109
1,0	10,0	0,241
5,0	50,0	1,188
8,0	80,0	1,891
10,0	100,0	2,398

Fonte: Aatoria Própria (2024)

A partir dos valores obtidos de absorvâncias e das concentrações de nitrogênio amoniacal, foi possível obter a curva padrão de concentração de nitrogênio amoniacal *versus* absorvância. Destaca-se que, além do ponto inicial, um ponto discrepante foi excluído para um ajuste mais preciso da curva, referente à absorvância de 0,064 e à concentração de nitrogênio amoniacal de 0,3 mg/L.

Gráfico 2: Curva Padrão de Concentração de Nitrogênio Amoniacal versus Absorbância

Fonte: Autoria Própria (2024)

Logo, com a curva padrão de concentração de nitrogênio amoniacal *versus* absorbância, podemos definir a concentração de nitrogênio amoniacal das amostras analisadas. Os valores obtidos estão representados na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Valores de Absorbância e Concentração de Nitrogênio Amoniacal para 20 °C

Amostra	Absorbância	Concentração de Nitrogênio Amoniacal (N – NH ₃)(mg/L)
1	0,468	1,964
2	0,624	2,618
3	0,785	3,294

Amostra 1 – Tempo de agitação de 15 minutos; Amostra 2 – Tempo de agitação de 30 minutos; Amostra 3 – Tempo de agitação de 45 minutos.

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 8 - Valores de Absorbância e Concentração de Nitrogênio Amoniacal para 35 °C

Amostra	Absorbância	Concentração de Nitrogênio Amoniacal ($N - NH_3$)(mg/L)
1	0,688	2,887
2	0,847	3,554
3	1,012	4,246

Amostra 1 – Tempo de agitação de 15 minutos; Amostra 2 – Tempo de agitação de 30 minutos; Amostra 3 – Tempo de agitação de 45 minutos.

Fonte: Autoria Própria (2024)

As Tabelas 6 e 7 indicam que há uma relação direta entre o tempo de agitação e a quantidade de nitrogênio amoniacal detectada, em ambas as temperaturas analisadas. Observa-se que, com o aumento do tempo de agitação, a concentração de nitrogênio amoniacal também aumenta. Este resultado é coerente com os estudos de Zhang et al. (2019), que observaram um aumento gradual na concentração de nitrogênio amoniacal com o aumento do tempo de agitação durante a extração de compostos amoniacais de resíduos orgânicos.

Além disso, é possível notar que a temperatura também influenciou na concentração de $N - NH_3$. Analisando as informações entre as duas variações de temperatura, nota-se que a quantidade de nitrogênio amoniacal é mais elevada nas amostras a 35 °C quando comparadas com as amostras a 20 °C, para os mesmos tempos de agitação. Esse comportamento é semelhante ao observado por Liu et al. (2021), que relataram um aumento na liberação de nitrogênio amoniacal em temperaturas mais altas, o que é consistente com a maior solubilização de compostos voláteis em condições térmicas elevadas.

5.3 Potencial Bioquímico do Metano (PBM)

Os dados de Potencial Bioquímico do Metano (PBM) foram obtidos para duas amostras: Cama *in natura* e sobrenadante. A análise de produção de biogás ao longo do tempo foi realizada em três concentrações diferentes e os resultados estão apresentados na Tabela 9 e 10.

Tabela 9 - Níveis de Produção de Biogás ao Longo do Tempo para a Cama in Natura

Data	Produção 1 (mL)	Produção 2 (mL)	Produção 3 (mL)	Produção Média (mL)	Produção Total (mL)
08/11/2023	0	0	0	0	0
09/11/2023	16	32	25	26,5	26,5
10/11/2023	-3	59	29	44	70,5
11/11/2023	15	148	105	126,5	197
14/11/2023	8	298	235	266	463
17/11/2023	-1	294	247	268	731
19/11/2023	2	62	70	66	797
20/11/2023	6	57	52	52	849
21/11/2023	-7	73	63	61,5	910,5
22/11/2023	1	37	24	29,5	940
23/11/2023	1	30	18	24	964
24/11/2023	0	23	12	17,5	981,5
27/11/2023	15	76	45	55	1036,5
28/11/2023	1	17	8	11,5	1048
29/11/2023	7	22	12	14	1062
30/11/2023	5	21	9	13	1075
01/12/2023	7	19	10	12,5	1087,5
04/12/2023	-24	48	26	31	1118,5
05/12/2023	0	8	0	4	1122,5
06/12/2023	0	6	1	3	1125,5
07/12/2023	1	10	3	5	1130,5
08/12/2023	4	5	7	3	1133,5
11/12/2023	4	16	13	13,5	1147
12/12/2023	7	9	5	5,5	1152,5
13/12/2023	7	11	7	7	1159,5
14/12/2023	12	12	10	6,5	1166
18/12/2023	-33	40	25	27,5	1193,5

Produção 1 – Concentração de 4,1; Produção 2 – Concentração de 4,2; Produção 3 – Concentração de 4,3.

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 10 - Níveis de Produção de Biogás ao Longo do Tempo para o Sobrenadante

Data	Produção 1 (mL)	Produção 2 (mL)	Produção 3 (mL)	Produção Média (mL)	Produção Total (mL)
08/11/2023	0	0	0	0	0
09/11/2023	2	20	0	-	0
10/11/2023	1	-5	5	3	3
11/11/2023	11	6	7	9	12
14/11/2023	80	-10	84	81,5	93,5
17/11/2023	59	4	58	56	149,5
19/11/2023	11	1	-78	-	149,5
20/11/2023	9	0	6	5	154,5
21/11/2023	20	0	14	10,5	165
22/11/2023	3	-1	2	1,5	166,5
23/11/2023	-2	1	0	-	166,5
24/11/2023	-3	0	-21	-	166,5
27/11/2023	2	1	3	-	166,5
28/11/2023	1	0	0	-	166,5
29/11/2023	2	0	2	-	166,5
30/11/2023	2	0	1	-	166,5
01/12/2023	3	1	2	-	166,5
04/12/2023	6	-1	4	-	166,5
05/12/2023	0	1	0	0	166,5
06/12/2023	0	0	0	-	166,5
07/12/2023	0	0	0	-	166,5
08/12/2023	2	0	1	-	166,5
11/12/2023	1	0	0	-	166,5
12/12/2023	0	1	0	-	166,5
13/12/2023	1	0	0	-	166,5
14/12/2023	5	8	3	-	166,5
18/12/2023	4	-7	2	-	166,5

Produção 1 – Concentração de 4,1; Produção 2 – Concentração de 4,2; Produção 3 – Concentração de 4,3.

Fonte: Autoria Própria (2024)

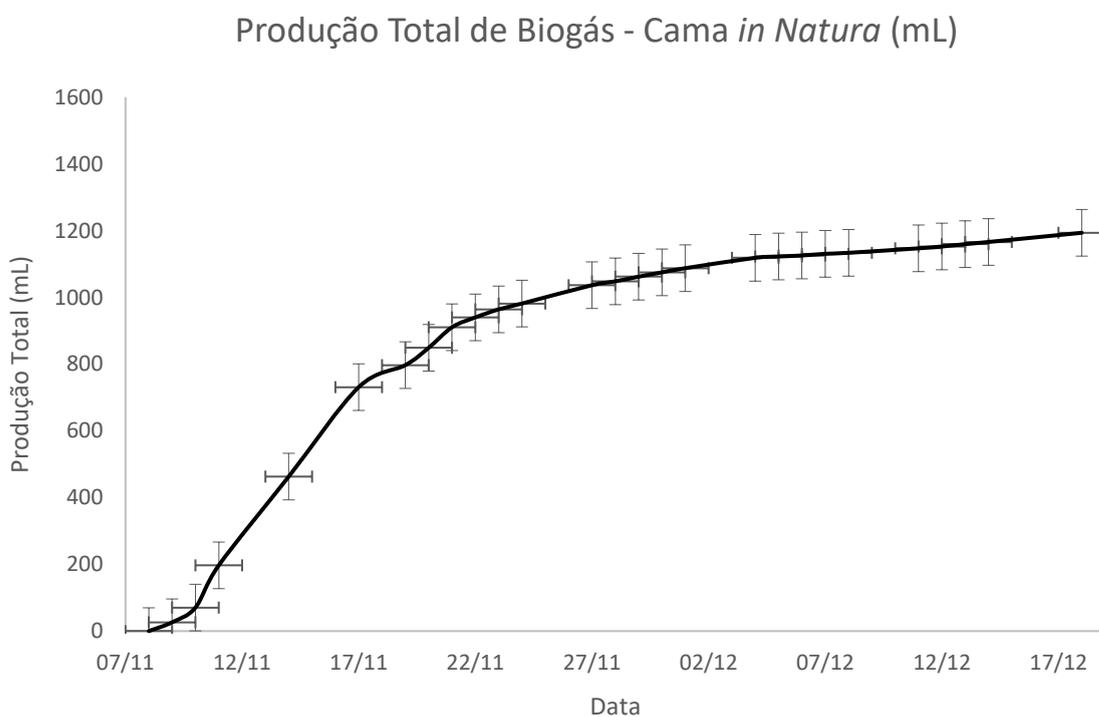
Para representar a evolução da produção ao longo do tempo, tanto da cama *in natura* como do sobrenadante, foram elaborados os gráficos das produções acumuladas, utilizando os dados das produções totais presentes nas Tabelas 8 e 9 e estão representados no Gráfico 3 e 4. Esses gráficos permitem visualizar a tendência de crescimento da produção e facilita a interpretação dos resultados.

Além disso, utilizando o Excel, foram calculados os desvios padrões

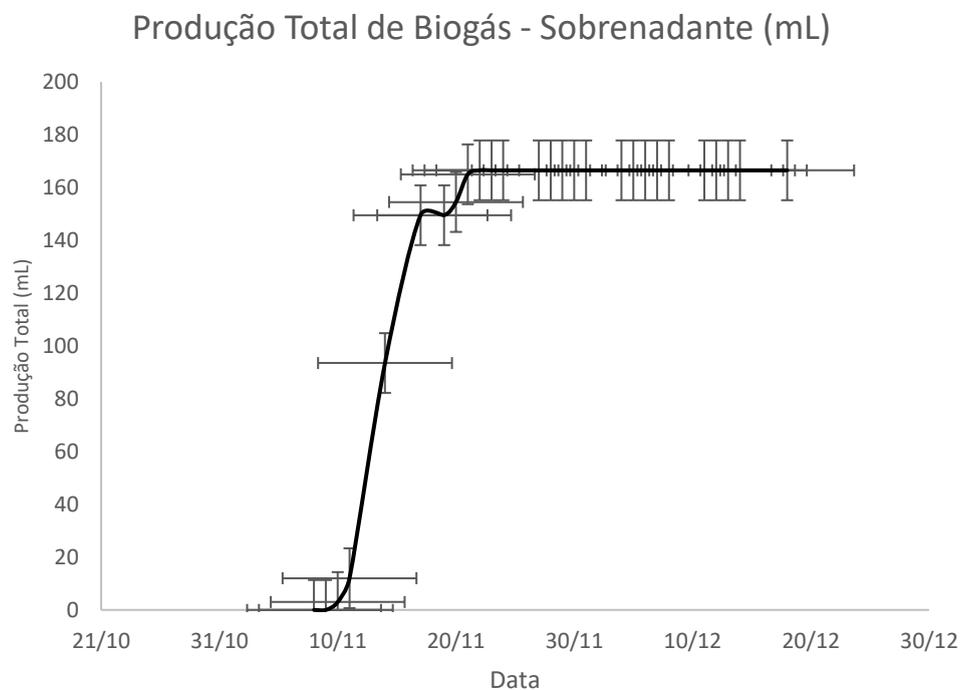
amostral das produções média, para representar a dispersão dos valores em relação à média da amostra, os quais apresentaram um valor aproximado de 69,84 para a cama *in natura* e 29,42 para o sobrenadante. A partir desse cálculo, determinou-se os erros padrões das médias, que indicam a precisão da estimativa da média populacional com base nos dados coletados. Os valores obtidos foram de aproximadamente 13,44 para a cama *in Natura* e 5,66 para o sobrenadante.

Para enriquecer a análise gráfica, barras de erro foram adicionadas aos gráficos, representando os respectivos erros padrões da média. Essa abordagem permite observar a variação dos dados e avaliar a confiabilidade dos valores apresentados ao longo do período analisado.

Gráfico 3 - Gráfico da Produção Acumulada de Biogás da Cama in Natura com Barras de Erro



Fonte: Autoria Própria (2025)

Gráfico 4 - Gráfico da Produção Acumulada de Biogás do Sobrenadante com Barras de Erro

Fonte: Autoria Própria (2025)

Segundo Soares (2021), em sua pesquisa sobre a utilização da cama de aviário para geração de biogás em uma usina de compostagem, verificou-se que os valores médios da produção acumulada de biogás variaram entre 800 e 1200 mL, com um desvio padrão médio de aproximadamente 70 mL. Esses valores são coerentes com os obtidos no presente estudo, indicando que as condições experimentais adotadas apresentaram um desempenho semelhante ao observado em sistemas já analisados na literatura.

Além disso, o estudo realizado pelo Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBiogás (2020) apresentou um potencial de produção de biogás a partir da cama de aviário com variações significativas devido à composição da biomassa e às condições ambientais. O desvio padrão médio encontrado nesse estudo foi de 65,7 mL, o que corrobora com os valores encontrados na presente pesquisa e sugere que os resultados obtidos seguem a tendência esperada para esse tipo de substrato.

Analisando então as Tabelas 8 e 9 foi possível verificar que produção total de biogás da cama *in natura* ao final do período foi de 1193,5 mL. Já para o sobrenadante, a produção total de biogás ao final do período foi de 166,5 mL.

Além disso, as amostras de biogás obtidas da cama *in natura* e do sobrenadante foram analisadas para determinar as concentrações de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S). Os resultados dessas análises estão apresentados na Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 - Concentrações de Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2), Oxigênio (O_2) e Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) do biogás produzido pela amostra da Cama *in Natura*

Data	CH_4 (%)	CO_2 (%)	O_2 (%)	H_2S (ppm)
14/11/2023	37,1	44,0	1,4	88,6
19/11/2023	39,4	51,5	1,7	4380
24/11/2023	46,0	48,1	0,8	>5000
06/12/2023	41,9	48,8	2,2	>5000
18/12/2023	43,5	46,3	1,5	>5000

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 12 - Concentrações de Metano (CH_4), Dióxido de Carbono (CO_2), Oxigênio (O_2) e Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) no biogás produzido pela amostra do Sobrenadante

Data	CH_4 (%)	CO_2 (%)	O_2 (%)	H_2S (ppm)
24/11/2023	43,6	17,1	1,3	3707

Fonte: Autoria Própria (2024)

As análises indicaram que a concentração de metano (CH_4) variou entre 37,1% e 46,0% nas amostras da cama *in natura*, enquanto o dióxido de carbono (CO_2) variou entre 44,0% e 51,5%. A presença de oxigênio (O_2) foi relativamente baixa, variando de 0,8% a 2,2%, o que é um valor esperado, pois na produção de biogás, os processos que predominam são os anaeróbicos (Deublein & Steinhauser, 2011).

Essa variação na concentração dos gases ao longo do tempo pode ser atribuída ao próprio processo experimental. Inicialmente, a amostra gasosa se encontrava diluída devido à presença de ar atmosférico (composto majoritariamente por nitrogênio e oxigênio) e a falta de metano e CO_2 no eudiômetro. Com o passar do tempo, esse ar foi gradativamente substituído pelo

biogás gerado pela degradação anaeróbia das amostras, resultando no aumento da concentração de metano e dióxido de carbono (CO_2) até atingir um estado de estabilização. Esse comportamento já foi observado em outros estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos orgânicos (Angelidaki et al., 2009; Weiland, 2010), reforçando que a fase inicial é uma característica natural do processo de adaptação do sistema à degradação da matéria orgânica.

As concentrações de sulfeto de hidrogênio (H_2S) mostraram variação significativa, com valores registrados até 4380 ppm, o qual pode ser considerado um valor elevado e isso demonstra que há a necessidade de tratamento desse gás, que pode ser corrosivo e tóxico, antes de qualquer uso do biogás gerado (Wellinger, A., & Lindberg, A., 1999).

Já na amostra do sobrenadante, a concentração de metano (CH_4) foi de 43,6%, do dióxido de carbono (CO_2) foi de 17,1%, do oxigênio (O_2) foi de 1,3% e o sulfeto de hidrogênio (H_2S) foi de 3707 ppm.

Estudos indicam que o biogás produzido a partir da fermentação da cama de aviário geralmente consiste em aproximadamente 60% de metano e 38% de dióxido de carbono, com os 2% restantes compostos por vapor d'água, amônia e sulfeto de hidrogênio (EDWARDS & DANIEL, 1993; LACTEC, 2021). Comparando esses dados com os resultados obtidos para o sobrenadante, observa-se uma concentração de metano relativamente próxima, porém uma concentração de CO_2 significativamente menor. A menor concentração de CO_2 nas amostras do sobrenadante, em comparação com as amostras da cama *in natura*, já era esperado pois, a maior parte da matéria orgânica da própria cama *in natura*, ficou na parte sólida da amostra inicial e apenas uma parte foi dissolvida no sobrenadante.

Assim, com os valores dos níveis de produção de biogás, da porcentagem de sólidos voláteis e das massas iniciais de cada amostra, foi possível verificar o valor do PBM para a cama *in natura* e para o sobrenadante, apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado do PBM (NmLbiogás/gSVadic) para Cama in Natura e Sobrenadante

Amostra	Concentração de Sólidos Voláteis (%)	Média da Massa da amostra (g)	Resultado do PBM (NmLbiogás/gSVadic)
Cama <i>in natura</i>	5	93,06	256,50
Sobrenadante	1	169,58	98,18

Fonte: Autoria Própria (2024)

Com base na Tabela 12, foi possível verificar que o resultado do PBM da cama *in natura* foi relativamente alto e também apresentou uma alta concentração de sólidos voláteis. A média da massa da amostra foi utilizada como parâmetro para padronização das análises, garantindo maior precisão na interpretação dos resultados.

A média da massa da amostra refere-se à quantidade média de substrato inserida nos reatores para a determinação do PBM, calculada a partir da pesagem das triplicatas utilizadas em cada ensaio. A utilização dessa média tem como objetivo garantir a uniformidade entre as amostras analisadas, minimizando variações e permitindo a obtenção de resultados mais representativos para o processo de digestão anaeróbia.

Com os resultados obtidos, foi possível verificar que a cama *in natura* é eficiente na produção de biogás, especificamente metano, por unidade de sólidos voláteis adicionados. A alta concentração de SV sugere que há uma quantidade significativa de matéria orgânica disponível para a digestão anaeróbia, resultando em maior produção de biogás.

De acordo com Franceschi et al. (2015), a biomassa da cama de aviário apresenta elevado potencial energético, sendo eficiente na substituição de combustíveis tradicionais e energia elétrica em propriedades avícolas do Paraná. Além disso, Silva (2010) observou que a combinação de 74% de sólidos totais (ST) de cama de aviário com 26% de ST de palha de trigo resultou em uma produção de 419,77 L de biogás/kgST e 244,83 L de metano/kgST, comprovando a viabilidade da digestão anaeróbia desses materiais.

O sobrenadante tem uma concentração de sólidos voláteis menor e, conseqüentemente, um resultado do PBM mais baixo. A menor concentração de SV indica que há uma menor quantidade de matéria orgânica disponível para a digestão anaeróbia o que afeta a produção de biogás por unidade de sólidos

voláteis adicionada. De acordo os os estudos de Diesel, Miranda e Perdomo (2002), a produção de biogás do sobrenadante também foi relativamente menor devido à menor disponibilidade de matéria orgânica para os microorganismos e isso corrobora os resultados encontrados nessa pesquisa.

Analisando então, as Tabelas 8, 9, 10, 11 e 12 foi possível verificar que a quantidade total de produção de biogás da cama *in natura* ao final do período teve um valor consideravelmente bom. A composição do biogás indicou uma concentração significativa de metano (CH_4), o que é um ótimo indicador para a qualidade do biogás, porém também indicou uma quantidade elevada de sulfeto de hidrogênio (H_2S) o que pode representar um desafio para a sua utilização devido ao seu caráter corrosivo e odor desagradável.

Já para o sobrenadante, a produção total de biogás ao final do período não foi tão alta. Além disso, também apresentou um valor significativamente alto de produção de sulfeto de hidrogênio (H_2S) o que pode indicar que talvez seu uso não seja tão desejado.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência da temperatura no processo de extração sólido-líquido de carbono orgânico utilizando como matéria orgânica a cama de aviário. Para isso, foi necessário realizar análises de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF), sólidos voláteis (SV), nitrogênio amoniacal e potencial bioquímico do metano (PBM).

Os resultados das análises de ST, SF e SV revelaram que, tanto a 20 °C quanto a 35 °C, as concentrações desses sólidos na fase sólida foram significativamente maiores do que na fase líquida. Isso se deve a composição da cama de aviário, em que em sua grande maioria é composta por materiais que não se dissolvem em água e mesmo após o processo de agitação e decantação, permanecem na fase sólida. Observou-se também que, a 35 °C, houve um aumento nas concentrações de Sólidos Totais e Sólidos Voláteis em comparação a 20 °C, indicando uma maior eficiência na extração de compostos orgânicos voláteis em temperaturas mais elevadas.

A análise de nitrogênio amoniacal ($N - NH_3$) mostrou que há uma relação entre o tempo de agitação e a concentração desse composto, em ambas as temperaturas. Além disso, a concentração de $N - NH_3$ foi maior nas amostras analisadas a 35 °C, o que reforça a eficiência de temperaturas mais altas no processo de extração de compostos orgânicos. Esse aumento é crucial para a avaliação do potencial de fertilização e do impacto ambiental da cama de aviário.

Os dados de PBM indicaram que a produção total de biogás da cama *in natura* teve um melhor resultado em comparação a do sobrenadante. A cama *in natura* apresentou um PBM elevado, refletindo sua eficiência na produção de biogás devido à alta concentração de sólidos voláteis. Por outro lado, o sobrenadante, com menor concentração de SV, resultou em uma produção de biogás inferior.

Análises da composição do biogás demonstraram uma concentração considerável de metano (CH_4) especialmente na cama *in natura*, o que é positivo para a qualidade do biogás. No entanto, a presença elevada de sulfeto de hidrogênio (H_2S) representa um desafio devido ao seu caráter corrosivo, tóxico e ao seu odor desagradável, necessitando de tratamento adequado antes da utilização do biogás.

Com isso, foi possível concluir que a temperatura desempenha um papel fundamental na eficiência do processo de extração sólido-líquido de carbono orgânico de cama de aviário. A 35 °C, tanto a extração de sólidos voláteis quanto a produção de nitrogênio amoniacal são mais eficientes. Além disso, a cama in natura demonstra um potencial significativo para a produção de biogás, especialmente metano, embora a presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S) exija tratamentos adicionais para o biogás produzido antes de sua utilização.

Este estudo fornece uma base importante para o desenvolvimento de processos mais eficientes e sustentáveis na gestão de resíduos de cama de aviário, contribuindo para a valorização desses composto através da produção de biogás e potencial fertilizante e isso, conseqüentemente, diminuirá o risco de contaminação química e microbiológica do solo e da água oriundos de descartes incorretos desse material. Futuros estudos podem focar na otimização dos parâmetros de temperatura e do processo de extração de nitrogênio amoniacal ($N - NH_3$), além de métodos eficazes para a remoção de sulfeto de hidrogênio (H_2S) do biogás.

7 REFERÊNCIAS

AIRES, A. M. et al. **Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte com ou sem separação das frações sólida e líquida sobre a produção de biogás e a qualidade do biofertilizante**. Parte da Dissertação do Primeiro Autor (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus de Jaboticabal-SP, 2009.

AIRES, A. M. et al. **Desenvolvimento de um sistema para o pré-processamento da cama de frangos de corte destinada a biodigestão anaeróbia e compostagem “in-vasse”**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013

AMARAL, A. G.; YANAGI JUNIOR, T.; LIMA, R. R.; TEIXEIRA, V. H. **Efeito do ambiente de produção sobre frangos de corte sexados criados em galpão comercial**. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 63, n. 3, p. 649-656, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abmvz/a/7cwR7C9TDSfhPC68ybbQHny/>. Acesso em: 19 de junho de 2022.

APHA (*American Public Health Association*). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.

AVICULTURA INDUSTRIAL. **Custo de energia das granjas - o item de maior custo de produção para os integrados da avicultura de corte**. 2016. Disponível em: <<https://www.aviculturaindustrial.com.br/imprensa/custo-de-energia-das-granjas-o-item-de-maior-custo-de-producao-para-os/20160516-095510-c801>>. Acesso em: 19 de junho de 2022.

AVICULTURA INDUSTRIAL. **Produção brasileira de frango deve crescer 2% em 2022, aponta USDA**. 2022. Disponível em: <<https://www.aviculturaindustrial.com.br/imprensa/producao-brasileira-de-frango-deve-crescer-2-em-2022-aponta-usda/20220516-085824-W746>>. Acesso em: 28 de maio de 2022.

AVILA, V. S. de; MAZZUCO, H.; FIGUEIREDO, E. A. P. de. **Cama de aviário: materiais, reutilização, uso como alimento e fertilizante**. Concórdia: Embrapa-CNPASA, 1992. 38 p. (Circular Técnica, 16). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/436062>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2025.

BALDIN, V. **GERAÇÃO DE ENERGIA NA AVICULTURA DE CORTE A PARTIR DA CAMA DE AVIÁRIO**. 2013, PPGEE-PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil, 2011.

BGS EQUIPAMENTOS. **Fatores que influenciam a produção de biogás**. Disponível em: <<https://www.bgsequipamentos.com.br/fatores-que-influenciam-producao-biogas/>>. Acesso em: 01 de junho de 2022.

BORTOLINI, J. **Uso de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da cama de aviário**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 5, p. 317-323, 2019.

BOTEGA, Jéssica Luiza. **Compostagem e caracterização físico-química de substrato de cama de aviário: estudo de caso**. 2019. 90 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5252/1/substratocamaaviario.pdf>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2025

BRATTI, F. C. **Uso da cama de aviário como fertilizante orgânico na cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2013. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1527/1/DV_PPGZO_M_Bratti%2C%20Fabio%20Cesar_2013.pdf. Acesso em: 23 de fevereiro de 2025.

CESAR, J. Agência Embrapa de Informação Tecnológica – **ÁRVORE DO CONHECIMENTO: Frango de Corte - Meio ambiente**. 2022. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/frango_de_corte/arvore/CONT000fy1j9mkm02wx5ok0pvo4k3wtriw3t.html>. Acesso em: 30 de maio de 2022.

CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis. **NOTA TÉCNICA – PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DA AVICULTURA DE CORTE**. 2020. Disponível em: <https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/05/NT001-20_Producao_Biogas_Avicultura_Corte.pdf>. Acesso em: 29/01/2025.

COSTA, D. F. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás do Tratamento de Esgoto**. 2006 Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2006.

DE MENDONÇA, H. V.; OTENIO, M. H.; DE PAULA, V. R. **Anaerobic digestion for the production of renewable energy**. *Revista em Agronegocio e Meio Ambiente*, v.14, n. 3, 2021. *University Center of Maringa*.

Deublein, D., & Steinhauser, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction**. Wiley-VCH, 2011.

DIESEL, C.; MIRANDA, L. A. S.; PERDOMO, C. C. **Avaliação da cama de aviário como substrato para digestão anaeróbia**. 2002.

DIN - Deutsches Institut für Normung. **DIN 38414-8: German standard methods for the examination of water, wastewater and sludge - sludge and sediments (group S) - Part 8: Determination of the amenability to anaerobic digestion (S8)**. Berlin: Beuth Verlag, 1985.

FERNANDES, J. D. et al. **Tratamento térmico da cama de aviário: Parte I. Caracterização por análises imediatas e rendimento gravimétrico.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 9, p. 635-641, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/i/2022.v26n9/>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2025.

FRANCESCHI, V. T. et al. **Potencial energético da cama de aviário produzida na região sudoeste do Paraná utilizada como substrato para a produção de biogás.** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE BIOPROCESSOS; SIMPÓSIO DE HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DE BIOMASSAS, 2015, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Sociedade Brasileira de Bioengenharia, 2015. Disponível em: <<https://proceedings.science/sinaferm/sinaferm-2015/papers/potencial-energetico-da-cama-de-aviario-produzida-na-regiao-sudoeste-do-parana-u?lang=pt-br>>. Acesso em: 29 de janeiro de 2025.

GARCÊS, A.; AFONSO S. M. S.; CHILUNDO, A.; JAIROCE, C. T. S. **Evaluation of different litter materials for broiler production in a hot and humid environment: 1. Litter characteristics and quality.** *The Journal of Applied Poultry Research* 2013;22: 168-176.

GARCIA, R. G.; RORIZ, B. C.; NÄÄS, I. A.; et al. **Multi-attribute evaluation and selection of broiler house for the low prevalence of footpad lesion.** *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, v. 21, n. 1, 2019. Fundação APINCO de Ciência e Tecnologia Avícolas.

GARCIA, Sarah Sgavioli, Profa. Dra. Ana Carolina Amorim Orrico, Rodrigo Garófallo. **Estratégias Para a Utilização de Camas Em Aviário.** Engormix, 27 de setembro de 2015. Disponível em: <pt.engormix.com/avicultura/artigos/estrategias-utilizacao-camas-aviario-t38635.htm>

GOMIDE, P. H. O.; CRUZ, J. C. **Impactos ambientais do uso de cama de aviário como fertilizante e alternativas para seu aproveitamento energético.** *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 9, n. 2, p. 145-152, 2014.

HAHN, L. **PROCESSAMENTO DA CAMA DE AVIÁRIO E SUAS IMPLICAÇÕES NOS AGROECOSSISTEMAS.** 2004.

LIMA, N. D. S.; GARCIA, R. G.; NÄÄS, I. A.; CALDARA, F. R.; PONSÓ, R. **Model-predicted ammonia emission from two broiler houses with different rearing systems.** *Scientia Agricola* 2015; 72: 393-399.

MENDES, O. T. **Bem-estar animal na produção de frangos de corte no Brasil.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Medicina Veterinária) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/17987/1/2017_OberdanThomazMendes_tcc.pdf. Acesso em: 18 de fevereiro de 2025

NAEGELE, H. et al. **Methane and electricity production from poultry litter digestion in the context of energy potential assessment.** *Waste and Biomass Valorization*, v. 12, p. 123-134, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-021-01360-x>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2025.

NASCIMENTO, L. A. B. **Análise Energética na Avicultura de Corte: Estudo de Viabilidade Econômica para um Sistema de Geração de Energia Elétrica Eólico - Fotovoltaico Conectado à Rede.** 2011, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil, 2011.

NEPER – Núcleo de Estudo e Pesquisa em Resíduos Sólidos. **Digestão anaeróbia.** Disponível em: <<http://neper.shs.eesc.usp.br/digestao-anaerobia/>>. Acesso em: 04 de junho de 2022.

OLIVEIRA, M. P.; PARANHOS, A. G. O.; ADARME, O. F. H.; AQUINO, S. F. **Pré-tratamento hidrotérmico da cama de aviário para otimização da produção de biogás.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 4, p. 417-424, 2014.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction.** *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, 2011.

ANGELIDAKI, I. ET AL. **Biogas production: Current state and perspectives.** *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 83, n. 5, p. 849-860, 2009.

PALHARES, J. C. P. **Manejo ambiental da cama de aviário.** *Embrapa Pecuária Sudeste*, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1074604/manejo-ambiental-da-cama-de-aviario>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2025.

PERSZEL, Aline. **Avaliação da cama de aviário como substrato para digestão anaeróbia.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11486/1/FB_COEAM_2018_1_04.pdf. Acesso em: 28 de abril de 2022.

PURSWELL, J. L.; LUCK, B. D.; DAVIS, J. D. **Effect of air deflectors on fan performance in tunnel-ventilated broiler houses with a dropped ceiling.** *Applied Engineering in Agriculture* 2014; 30: 471-475.

RER – Radio Entre Rios. **Exportações de Carne de Frango Subiram 5,7% Em Abril de 2022.** Disponível em: <radioentrierios.com.br/site/2022/05/26/exportacoes-de-carne-de-frango-subiram-57-em-abril-de-2022/>. Acesso em: 28 de maio de 2022.

REVISTA AGROPECUÁRIA. Revista Agropecuária - **Bem-estar animal: Maior produtividade e qualidade do produto final**. 2012 Disponível em: <<http://www.revistaagropecuaria.com.br/2012/12/31/bem-estar-animal-maior- produtividade-e-qualidade-do-produto-final/>>. Acesso em: 30 de maio de 2022.

RODRIGUES, O. P. R, et al. **EVOLUÇÃO DA AVICULTURA DE CORTE NO BRASIL**. 2014, Centro Científico Conhecer.

SERGIO DE ZEN, P.; DEBATIN IGUMA, M.; BRITO ORTELAN, C.; HENRIQUE DOS SANTOS, V. S.; FELLI, C. B. **EVOLUÇÃO DA AVICULTURA NO BRASIL**.

SGAVIOLI, S.; CAROLINA, A.; RODRIGO GARÓFALLO GARCIA. **Estratégias para a utilização de camas em aviário**. Disponível em: <<https://pt.engormix.com/avicultura/artigos/estrategias-utilizacao-camas-aviario-t38635.htm>>

SILVA, F. M. **Desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícolas e da avicultura**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil 2010.

SILVA, W. R. **Estudo Cinético do Processo de Digestão Anaeróbica de Resíduos Sólidos Vegetais**. 2009, Tese (Doutorado em Química Analítica) -Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil 2009.

SOARES, GLAUBER MACHADO. **RELATÓRIO TÉCNICO: UTILIZAÇÃO DA CAMA DE AVIÁRIO DE USINA DE COMPOSTAGEM PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS**. Disponível em: <<https://ifg.edu.br/attachments/article/5213/Relat%C3%B3rio%20T%C3%A9cnico%20-%20Glauber%20Machado%20Soares.pdf>>. Acesso em: 29 de janeiro de 2025

SOUZA, S. N. M.; KUCZMAN, O.; OLIVEIRA, R. A. M. de; ESCOUTO, F. L. **Parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares**. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 2, n. 1, p. 1-9, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/biofix/article/download/55837/34260/0>. Acesso em: 28 de junho de 2022

TAIRA, K.; NAGAI, T.; OBI, T; TAKASE, K. **Effect of litter moisture on the development of footpad dermatitis in broiler chickens**. *The Journal of Veterinary Medical Science* 2014; 76: 583-586.

TESSARO, A. A. **Potencial Energético da Cama de Aviário Produzida na Região Sudoeste do Paraná Utilizada como Substrato para a Produção de Biogás**. 2011, Dissertação (Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia -

PRODETEC), Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) e o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba, 2011.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). ***International Egg and Poultry: Brazil Poultry and Products Annual***. Washington, D.C.: USDA, 2021. Disponível em: <https://www.usda.gov/data-reports/international-egg-and-poultry/brazil-poultry-and-products-annual-2021>. Acesso em: 28 de junho de 2022

VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 4630: Fermentation of organic materials - Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests**. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016.

VIRGINIO, Juliana. **Avicultura Brasileira Cresceu Em Produção, Exportação E Consumo per Capita Em 2020**. *Avicultura Industrial*, 29 de julho de 2020. Disponível em: < www.aviculturaindustrial.com.br/imprensa/avicultura-brasileira-cresceu-em-producao-exportacao-e-consumo-per-capita-em/20210428-090812-e877>. Acesso em: 01 de maio de 2022

WANG, B.; BJÖRN, A.; STRÖMBERG, S.; NGES, I. A.; NISTOR, M.; LIU, J. ***Evaluating the influences of mixing strategies on the Biochemical Methane Potential test***. *Journal of Environmental Management*, v. 185, p. 54-59, 2017

WEF. ***Anaerobic Digestion Fundamentals***. *Water Environment Federation*, 2017. Disponível em: <https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03---resources/wsec-2017-fs-002-mrrdc-anaerobic-digestion-fundamentals-fact-sheet.pdf>. Acesso em: 5 de junho de 2023.

WEILAND, P. **Biogas production: current state and perspectives**. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 85, n. 4, p. 849-860, 2010.

WELLINGER, A., & LINDBERG, A. ***Biogas upgrading and utilization***. *IEA Bioenergy Task 24*, 1999.