

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DIGESTÃO ANAERÓBIA DAS FRAÇÕES DA CAMA DE FRANGO

JAKSON BOFINGER

CASCADEL – PARANÁ
AGOSTO – 2019

JAKSON BOFINGER

DIGESTÃO ANAERÓBIA DAS FRAÇÕES DA CAMA DE FRANGO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Cascavel, em cumprimento aos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa

CASCADEL – PARANÁ

AGOSTO – 2019

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Bofinger, Jakson
Digestão Anaeróbia das Frações da Cama de Frango /
Jakson Bofinger; orientador(a), Mônica Sarolli Silva de
Mendonça Costa, 2019.
45 f.

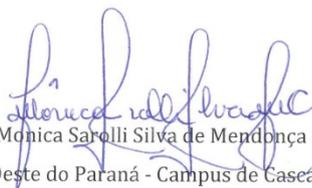
Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste
do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, 2019.

1. Balanço de Massa. 2. Resíduos. 3. Biogás. 4.
Biofertilizante. I. Costa, Mônica Sarolli Silva de Mendonça.
II. Título.

JAKSON BOFINGER

Digestão anaeróbia das frações da cama de frango

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Saneamento Ambiental, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Mônica Sarólli Silva de Mendonça Costa
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Jorge de Lucas Júnior
Universidade Estadual Paulista (UNESP)



Simone Damasceno Gomes
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 19 de agosto de 2019

BIOGRAFIA

JAKSON BOFINGER – Nascido em 20 de dezembro de 1982, natural de Cascavel, Paraná. Possui graduação em Zootecnia (2004) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus Cascavel, Paraná. Realizou sua pesquisa de mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, vinculado à área de concentração de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, atuando na linha de pesquisa de Saneamento Ambiental.

“Há três métodos para ganhar sabedoria: primeiro, por reflexão, que é o mais nobre; segundo, por imitação, que é o mais fácil; e terceiro, por experiência, que é o mais amargo”.

(Confúcio)

“A sabedoria é a meta da alma humana; mas a pessoa, à medida que em seus conhecimentos avança, vê o horizonte do desconhecido cada vez mais longe”.

(Heráclito)

“Todo mundo é um gênio. Mas, se você julgar um peixe por sua capacidade de subir em uma árvore, ele vai passar toda a sua vida acreditando que é estúpido”.

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

A minha esposa amada, Neiva Sales Rodrigues, responsável e incentivadora para a realização de meu mestrado, sem a qual não teria dado os passos necessários para o início desta etapa que aqui se encerra;

Ao meu pai, Ingolf Reinaldo Bofinger, pelo exemplo sólido de caráter, honestidade e humildade. A minha mãe, Ingrid Sagmeister Bofinger, pelo amor, afeto, afago e orações;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus Cascavel, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI), pela estrutura, a qual foi fundamental para o desenvolvimento dessa dissertação;

À professora e minha orientadora, Mônica Sarolli S. de M. Costa, pelo entendimento de minha situação profissional e por mesmo assim aceitar me orientar e contribuir de maneira imensurável para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal, e por não medir esforços pela formação de qualidade de seus alunos;

Ao Dr. Jorge de Lucas Júnior, pela ideia inicial e pelos direcionamentos em minha dissertação;

Às contribuições da banca examinadora da minha qualificação, composta pelos professores doutores Simone Damasceno Gomes e Jorge de Lucas Júnior. Às contribuições e à disponibilidade da banca examinadora da minha defesa de dissertação;

À equipe do Laboratório de Análise de Resíduos Agroindustriais (LARA), pela compreensão e a gentileza de adequarem seus horários à minha disponibilidade durante todas as atividades práticas realizadas durante estes dois anos de convivência, pelos ensinamentos, auxílios no experimento e coleta de dados, pelo convívio e o companheirismo;

Aos professores do PGEAGRI que contribuíram para minha formação. Aos técnicos dos laboratórios da área de concentração de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, pelos auxílios e instruções em algumas análises. Aos funcionários e à comunidade acadêmica da UNIOESTE. Aos colegas de mestrado.

DIGESTÃO ANAERÓBIA DAS FRAÇÕES DA CAMA DE FRANGO

RESUMO

A cama de frango (CF) é um resíduo gerado nas granjas de crescimento e engorda das aves, sendo seu destino final de responsabilidade do avicultor, em função do sistema de integração adotado pela grande maioria das granjas no Brasil. Devido ao custo para sua aquisição, a CF vem sendo reutilizada por vários lotes, o que tem alterado, principalmente, suas características químicas, em função do acréscimo de excretas e ração à sua composição. Para mitigar passivos ambientais, a CF deve ser estabilizada antes de ser disposta no solo como condicionador ou fonte de nutrientes. O processo de digestão anaeróbia é uma alternativa para a estabilização da CF com possibilidade de recuperação energética e de nutrientes. Entretanto, a DA em reatores do tipo tubular horizontal, mais comuns no meio rural do Brasil, requer a diluição da CF, dadas suas características físicas. Para tanto, estudou-se inicialmente diferentes diluições da CF em água (1:4; 1:6; 1:8; 1:10 e 1:12). Além do teste de diluição, a CF foi submetida ao pré-tratamento físico de separação de frações, seguida de um balanço de massa para caracterizar quantitativamente as frações líquida, sólida (retida na peneira) e íntegra (sem separação). Posteriormente, as diferentes frações foram submetidas a um ensaio do potencial bioquímico de metano (PBM) seguindo as normas da VDI-4630. Para finalizar, foi realizado um ensaio com alimentação semicontínua com o tratamento que apresentou os resultados mais adequados, testando a utilização de 40% de reciclo do digestato na diluição da CF. O balanço de massa foi importante para determinar as diluições utilizadas para o teste do PBM, em que foram utilizadas as diluições 1:6; 1:8 e 1:10. Apesar de conter a maior quantidade de sólidos voláteis, a fração retida na peneira não apresentou os maiores potenciais, devido à característica recalcitrante do carbono. O maior potencial obtido foi observado na fração líquida da diluição 1:6, seguida da fração íntegra da diluição 1:8, com potenciais de 215,96 e 198,28 litros CH₄ / kg SV adicionados, respectivamente. Os resultados obtidos com a condução do ensaio em alimentação semicontínua mostraram que a utilização de 40% de reciclo para diluição da CF não teve efeito inibitório no processo de DA, alcançando valores de 83,12 e 78,59 litros CH₄ / kg SV adicionados sem reciclo e com reciclo, respectivamente. Apesar de um menor valor numérico da produção com a utilização do reciclo, essa não foi estatisticamente diferente, com a vantagem de propiciar ao produtor uma economia de 40% na utilização de água limpa para diluição da CF, diminuindo os custos de produção, além de proporcionar um biofertilizante com maior quantidade de nitrogênio, um dos nutrientes mais exigidos pela maioria das culturas agrícolas.

Palavras-chave: Balanço de Massa, Resíduos, Biogás, Biofertilizante.

ANAEROBIC DIGESTION OF POULTRY LITTER

ABSTRACT

Poultry litter (PL) is the waste generated from growing and fattening poultry, and its final destination is responsibility of the poultry farmer due to the integration system adopted by the great majority of farms in Brazil. Due to the cost for its acquisition, the PL has been reused several times, which has changed mainly its chemical characteristics, due to the addition of excrements and poultry feed to its composition. To mitigate environmental liabilities, PL must be stabilized before being disposed in the soil as a conditioner or used as source of nutrients. The anaerobic digestion process is an alternative for the stabilization of PL with the possibility of energy and nutrient recovery. However, AD in horizontal tubular reactors, more common in Brazil, requires the dilution of PL, given its physical characteristics. Therefore, different PL dilutions in water were initially studied (1: 4; 1: 6; 1: 8; 1:10 and 1:12). In addition to the dilution test, the PL was subjected to physical fraction separation pretreatment, followed by a mass balance to quantitatively characterize the liquid, solid (sieve retained) and intact (no separation) fractions. Subsequently, the different fractions were subjected to a biochemical methane potential (BMP) test following VDI-4630 standards. Finally, a semicontinuous feeding trial was carried out with the treatment that presented the most adequate results, testing the use of 40% digestate recycle in the dilution of PL. Mass balance was important to determine the dilutions used for the BMP test, in which the 1:6, 1:8, and 1:10 dilutions were used. Although containing the largest amount of volatile solids, the fraction retained in the sieve did not have the highest potentials, due to the carbon's recalcitrant characteristic. The highest potential obtained was observed in the 1:6 dilution liquid fraction, followed by the 1:8 integral dilution fraction, with potentials of 215.96 and 198.28 liters CH₄ / kg SV added, respectively. The results obtained by conducting the semi-continuous feeding trial showed that the use of 40% recycle for PL dilution had no inhibitory effect on AD process, reaching 83.12 and 78.59 liters CH₄ / kg SV added with and without recycling, respectively. Despite a lower numerical value of production using recycle, this was not statistically different, with the advantage of providing the producer with a 40% savings in the use of clean water to dilute the PL, reducing production costs and providing a digestate with higher nitrogen content, one of the nutrients most required by most crops.

Key words: Mass Balance, Waste, Biogas, Digestate.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XI
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
3.1 Produção de frango de corte.....	4
3.2 Cama de Frango.....	7
3.3 Digestão Anaeróbia.....	9
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
4.1 Descrição do local de estudo.....	14
4.2 Cama de frango e inóculo.....	14
4.3 Teste de diluição e separação das frações.....	15
4.4 Ensaio do potencial bioquímico de metano (PBM).....	15
4.4.1 Monitoramento do biogás.....	17
4.5 Ensaio semicontínuo.....	17
4.6 Métodos analíticos.....	19
4.7 Análises estatísticas.....	20
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
5.1 Balanço de massa e separação de fração.....	21
5.2 Teste do potencial de produção de biogás.....	22
5.3 Ensaio semicontínuo.....	24
5.4 Biofertilizante.....	25
6 CONCLUSÕES.....	27
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
8 REFERÊNCIAS.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Diluições utilizadas no experimento.....	25
Tabela 2 Composição dos tratamentos.....	27
Tabela 3 Alimentação diária durante o ensaio semi-contínuo.....	28
Tabela 4 Teste de diluição e balanço de massa.....	31
Tabela 5 Série de sólidos das diferentes frações.....	32
Tabela 6 Potencial bioquímico...de metano por kg de sólidos voláteis.....	32
Tabela 7 Produção fase semi-contínua.....	34
Tabela 8 Análises químicas.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Evolução da produção brasileira de carne de frango nos últimos anos.....	15
Figura 2 Porcentagem de abate de frangos por regiões do Brasil sobre a produção total do país em 2016 (12,91 milhões de toneladas).....	16
Figura 3 Cadeia produtiva do frango de corte no sistema de integração.....	17
Figura 4 Teor de N em diferentes camas de aves em razão de diferentes matérias de origem e número de lotes de aves.....	19
Figura 5 Coleta do material na granja de criação.....	24
Figura 6 Separação de fração.....	25
Figura 7 Reator para o ensaio do potencial de produção de biogás.....	26
Figura 8 Biofertilizante utilizado para inocular microrganismos anaeróbios nos reatores.....	28
Figura 9 Desenho esquemático da seção transversal do reator modelo semicontínuo.....	29

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o segundo produtor mundial de carne de frango, atingindo a soma de 12,91 milhões de toneladas no ano de 2016, sendo que a estimativa é que para o ano de 2019 sejam produzidas 13,60 milhões (ABPA, 2017). Deste montante, o estado do Paraná foi responsável por 33,46%, aproximadamente 4,31 milhões de toneladas. O sistema de produção de frangos de corte predominante no Paraná é o integrado, em que grandes cooperativas fornecem os pintainhos de um dia para engorda, a ração, os medicamentos e o suporte técnico, além de ficar responsável pelo transporte, o abate e a comercialização do frango terminado. Já o produtor deve fornecer o espaço, as instalações, a mão de obra, a água, a energia e a cama utilizada na criação das aves, sendo também responsável pela destinação desta após o uso.

A cama de frango (CF) é um resíduo da produção avícola constituída por um material utilizado como leito para as aves, sendo comumente utilizada a maravalha, a serragem, a casca de arroz, a casca de amendoim, entre outros. A este material se juntam as excretas, água, ração, penas e plumas provenientes da criação das aves; portanto, este material precisa ser corretamente disposto no ambiente para evitar o risco de contaminação do solo ou dos corpos hídricos. Durante muito tempo, a CF foi utilizada na alimentação de grandes ruminantes, mas devido a problemas oriundos da Europa com a encefalopatia espongiforme bovina, o Ministério da Agricultura proibiu sua comercialização e utilização na alimentação de bovinos. Atualmente, no estado do Paraná, a destinação final mais comum para a CF é a disposição no solo como condicionador, sem estabilização prévia, o que pode se refletir em passivo ambiental ou mesmo comprometer a qualidade do solo e da água a médio ou longo prazos.

A digestão anaeróbia (DA) é uma alternativa promissora para estabilização e recuperação energética da CF, tendo em vista que possibilita a geração de dois produtos: o biogás e o biofertilizante. O biogás pode ser utilizado no aquecimento das instalações pela sua queima nas campânulas, ou então convertido em eletricidade por meio de um conjunto moto-gerador e, assim, diminuir os custos de produção. Já o biofertilizante pode ser utilizado no solo, principalmente como fonte de nutrientes para as culturas.

Porém, a DA em reatores do tipo tubular horizontal, mais comuns no meio rural do Brasil, requerem uma maior diluição da CF, dadas as suas características físicas. Além da diluição, a separação das frações sólida e líquida da CF para submissão ao processo de DA pode aumentar a vida útil funcional do reator pela diminuição do assoreamento, bem como reduzir o seu tamanho pela possibilidade de diminuição do tempo de retenção hidráulica (TRH), reduzindo os custos para sua instalação. A determinação do balanço de massa em função da separação das frações agrega informações importantes para a tomada de decisão sobre a implantação dos biodigestores, além de facilitar o manejo e o transporte da

fração sólida, bem como o dimensionamento do processo de estabilização necessário para sua destinação ao solo, seja a compostagem, a vermicompostagem ou o armazenamento estático até sua estabilização.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a digestão anaeróbia como alternativa para estabilização da cama de frango após oito lotes de criação, explorando o valor energético do biogás.

2.2 Objetivos específicos

- Testar diferentes diluições para cama de frango;
- Realizar o balanço de massa das diferentes diluições testadas;
- Determinar o potencial de produção de biogás para as diferentes diluições das frações líquidas, retidas na peneira e sem separação;
- Determinar a produção de biogás em um ensaio semicontínuo do maior potencial de produção de biogás com utilização de reciclo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Produção de frango de corte

Com o aumento da população mundial e o conseqüente aumento das áreas urbanas e a redução das áreas agrícolas, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas para melhorar os índices agronômicos e zootécnicos. Com este crescimento na demanda por proteína de origem animal, houve o processo de intensificação e modernização da avicultura, aumentando a densidade populacional de aves alojadas e, conseqüentemente, a quantidade de resíduo produzido em áreas concentradas (LYNCH et al., 2013).

Segundo dados da União Brasileira de Avicultura (UBABEF, 2013), estima-se que 90% da produção brasileira de frangos esteja vinculada ao sistema de integração entre produtores rurais e indústrias processadoras de aves. Essa relação se caracteriza juridicamente como uma parceria formal e não trabalhista, em que a empresa integradora fornece pintos de corte, ração balanceada, vacinas, medicamentos, desinfetantes, assistência técnica e transportes, enquanto os produtores rurais integrados ficam responsáveis por disponibilizar instalações e equipamentos, adquirir os insumos (material para calefação do ambiente, substrato para cama, energia elétrica, água) e fornecer mão de obra para a criação das aves (IPARDES, 2004), além da destinação ambientalmente correta dos resíduos produzidos.

Nestes contratos, cabe à agroindústria arcar com cerca de 90% dos custos de produção do frango de corte, enquanto o avicultor detém instalações e equipamentos e arca com cerca de 10% dos custos. O pagamento é feito com base no desempenho zootécnico dos lotes de frango entregues para abate (conversão alimentar e mortalidade). Esta divisão de tarefas apresenta a vantagem para o avicultor de reduzir sua exposição ao risco (sobretudo na variação do preço dos grãos), mas tem a desvantagem de gerar um rendimento muito próximo do custo de produção. Por este motivo, é importante complementar o rendimento com a venda ou uso de subprodutos, como é o caso da cama.

O sistema de integração foi a alternativa encontrada para atender às necessidades do mercado. Além de possibilitar uma fonte de renda bimensal garantida para pequenos produtores, também possibilita para a empresa integradora a padronização das aves para abate e a possibilidade de ter um cronograma de recebimento de aves para abate, facilitando o planejamento e garantindo o suprimento constante de aves ao mercado (UBABEF, 2011). A integração também facilitou o acesso dos produtores ao maior uso de tecnologias, melhoramento genético e ambiência para as aves, proporcionando, assim, aumento da produção por propriedade.

A modernização da avicultura também aumentou os custos com eletricidade para manter o ambiente adequado para as aves, gastos com comedouros e bebedouros

automatizados, exaustores, nebulizadores, iluminação induzida e aquecimento dos pintainhos nos primeiros dias de vida; em contrapartida, estes fatores possibilitaram o aumento da densidade populacional de aves por metro quadrado.

Somente em 2017, a produção do setor avícola mundial foi superior a 88 milhões de toneladas de carne. Neste mesmo ano, a produção total do Brasil foi de 13,05 milhões de toneladas, como pode ser observado na Figura 1, ficando atrás apenas dos Estados Unidos no ranking mundial de produção de carne de frango.

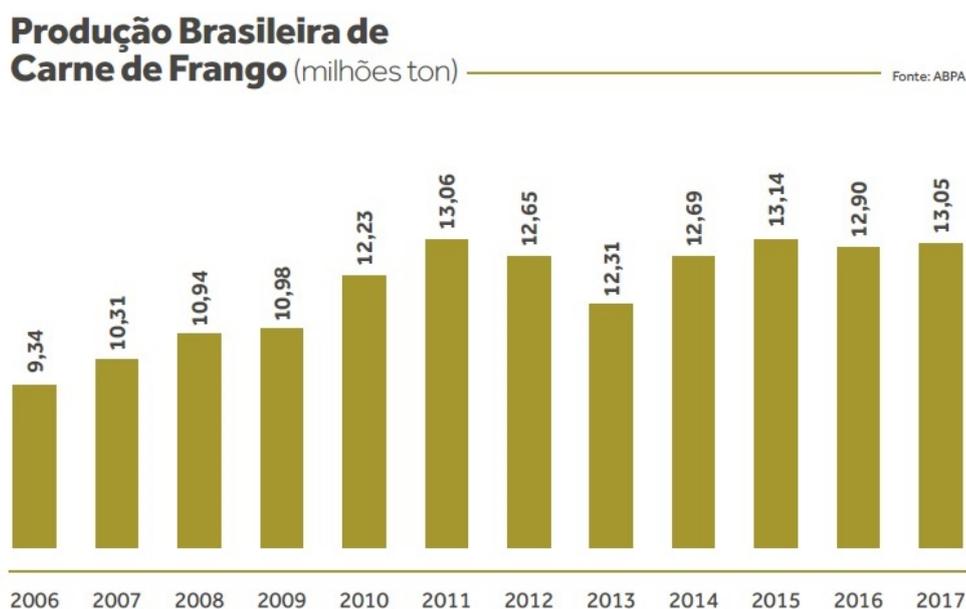


Figura 1 Evolução da produção brasileira de carne de frango nos últimos anos.
Fonte: ABPA (2017)

A região Sul do Brasil é responsável por mais de 60% da produção total brasileira de 2016, seguida pelas regiões Sudeste e Centro-Oeste (Figura 2). A projeção para a produção de aves é de crescimento, devido a aumentos previstos no consumo per capita e na exportação da carne de frango (RODRIGUES et al., 2014).

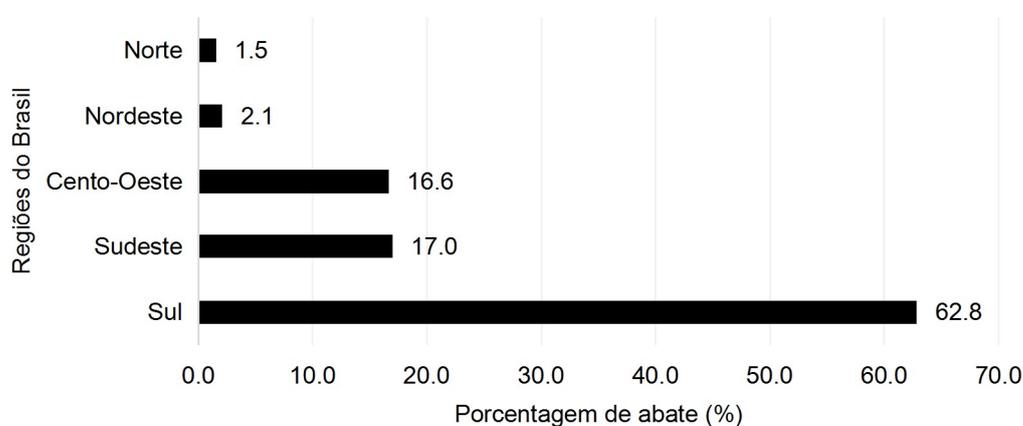


Figura 2 Porcentagem de abate de frangos por regiões do Brasil sobre a produção total do país em 2016 (12,91 milhões de toneladas).
Fonte: Modificado de ABPA (2017).

A cadeia produtiva da avicultura pode ser dividida em etapas: o avozeiro inicia a cadeia, é o local onde ficam as poedeiras avós, que são originadas a partir da importação de ovos das linhagens puras, as quais são cruzadas para produzir as matrizes. Em seguida, as aves geradas vão para o matrizeiro, que geralmente pertence à agroindústria e é o local onde serão gerados os ovos que irão para o incubatório. O incubatório ou nascedouro também pertence à agroindústria e recebe os ovos do matrizeiro para chocá-los e enviá-los ao nascedouro onde darão origem aos pintainhos, que serão levados aos aviários algumas horas depois de nascerem. O aviário é o local onde ficam caracterizados os contratos de integração entre a agroindústria/frigoríficos e o produtor: é no aviário que se dá o crescimento e a engorda dos frangos, onde permanecem até a idade de abate. O frigorífico é o quinto elo da cadeia produtiva, onde se origina o produto final, o frango resfriado, congelado, inteiro ou em cortes/pedaços, dependendo da necessidade do mercado (FREITAS et al., 2001).

As agroindústrias são responsáveis por grande parte da coordenação do funcionamento dessa cadeia produtiva, ficando a cargo do produtor as fases de crescimento e engorda das aves, bem como a disposição final dos resíduos gerados (aves mortas durante o processo e a cama de frango).

CADEIA PRODUTIVA DA AVICULTURA

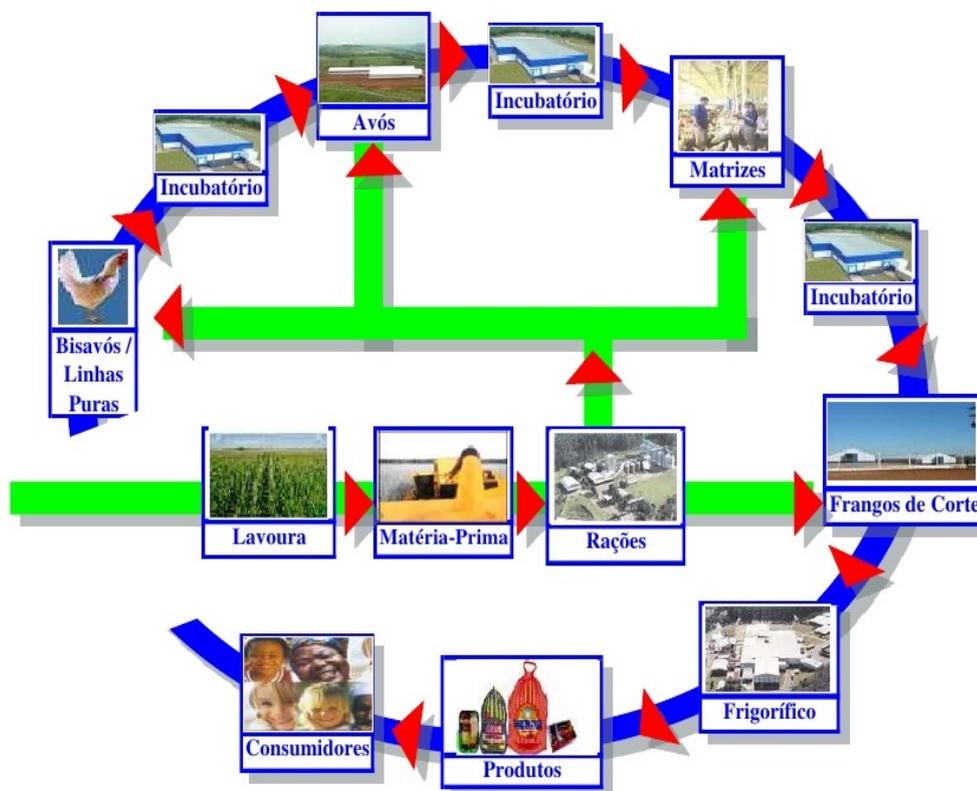


Figura 3 Cadeia produtiva do frango de corte no sistema de integração.
Fonte: Gestão da qualidade e segurança alimentar por Jose Luis Kielling Franco.

3.2 Cama de Frango

Denomina-se cama todo o material distribuído em um galpão ou estábulo para servir de leito aos animais. Mais especificamente, chama-se de cama de frango (CF) o material que, permanecendo no piso de uma instalação avícola, irá receber excreções, restos de ração e penas (EMBRAPA, 1992).

A CF é utilizada com o objetivo de impedir o contato direto dos animais com o piso, promover a absorção e a dessorção de água e incorporar excretas e penas. O material utilizado deve auxiliar na redução das oscilações de temperatura no interior do aviário, auxiliando, assim, a diminuir o estresse das aves, além de permitir que estas expressem seu comportamento natural e, dadas as características da avicultura atual com a reutilização da cama por vários lotes, também deve ter baixa biodegradabilidade. Desta forma, o material de cama deve ser escolhido criteriosamente, já que o animal permanecerá sobre ele durante todo o período de criação (BILGILI et al., 2009).

Os materiais utilizados como CF consistem em subprodutos industriais ou restos de culturas, a maioria produzido na propriedade ou adquirido das regiões produtoras. Segundo EMBRAPA (1992), uma cama de qualidade deve apresentar propriedades desejáveis como:

- Ser de tamanho médio (material picado ou triturado);
- Ter capacidade de absorver a umidade sem empastar;
- Liberar facilmente para o ar a umidade absorvida;
- Ter baixa condutividade térmica;
- Ter capacidade de amortecimento, mesmo sob alta densidade;
- Ter resistência a degradação;
- Ter baixo custo e disponibilidade.

Dentre os materiais mais utilizados e com melhores características físicas estão as maravalhas de madeira, mas devido à escassez destas, houve a necessidade da utilização de substratos alternativos que permitissem obter a mesma eficiência técnica que a maravalha. Dentre estes, pode-se citar a casca de arroz, fenos de diversos capins, palhadas de várias culturas, polpa de citrus, areia, bagaço de cana e outros materiais, geralmente com grande quantidade de lignina, a qual possui uma estrutura bem mais complexa que a celulose e a hemicelulose (GARCIA et al., 2010). A lignina é um polímero complexo com unidades ou blocos de fenil-propano, unidas por ligações tipo éster e carbono-carbono formando arranjos complexos.

A degradação da lignina é realizada principalmente por fungos que apresentam um sistema complexo de enzimas denominado ligninases, que atuam principalmente nos grupos metoxi (-OCH₃) e éster (-C-O-C), causando degradação parcial da sua estrutura e formação de produtos mais solúveis. A etapa final deve envolver a ruptura do anel aromático, que é realizada em várias etapas e por enzimas mais especializadas. Esta complexidade do

ataque e produtos de degradação é uma das razões da recalcitrância da molécula de lignina, sendo que a biodegradação destes compostos depende de sua estrutura química, da quantidade de celulose e hemicelulose presentes (KARTHIKEYAN; VISVANATHAN, 2013).

Vários fatores influenciam a composição químico-bromatológica da CF, como composição da ração, quantidade do material de cobertura do piso do galpão, estação do ano, densidade de alojamento das aves, tipo de substrato de cama, ventilação do galpão, nível de reutilização da cama e características das excretas das aves (FUKAYAMA, 2008), como pode ser observado na Figura 4.

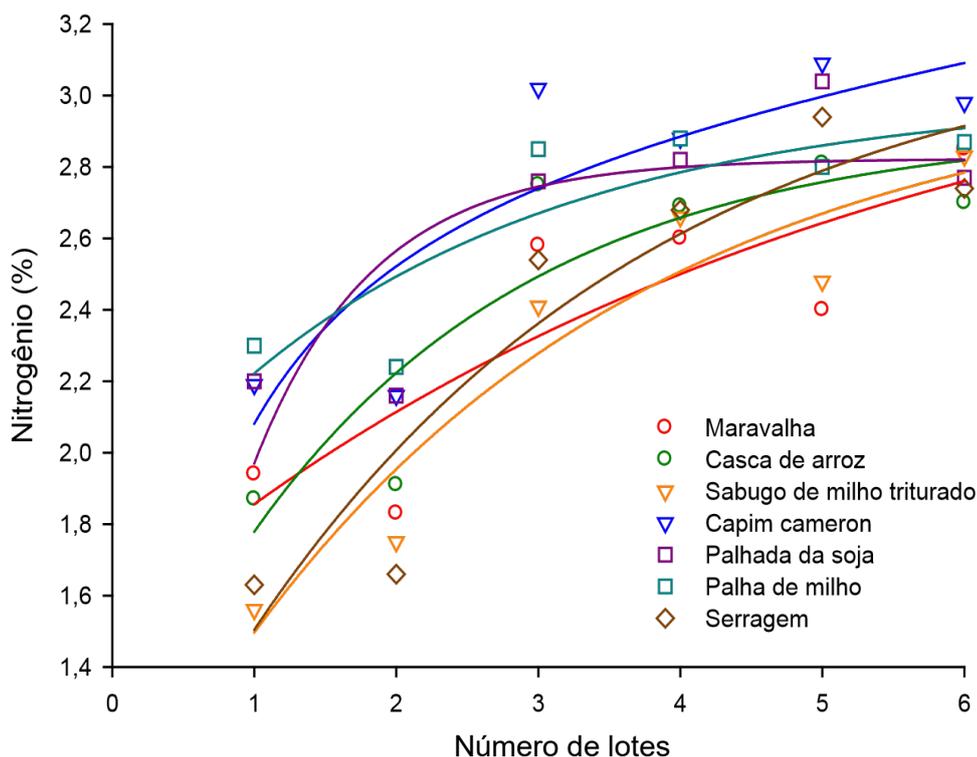


Figura 4 Teor de N em diferentes camas de aves em razão de diferentes matérias de origem e número de lotes de aves.

Fonte: Adaptado de Avila (2007).

Devido aos altos teores de proteína, aminoácidos e ácido úrico presentes nos dejetos das aves, o processo de digestão anaeróbia pode levar a um acúmulo de nitrogênio na forma de amônias o que pode levar a uma queda no rendimento ou até à completa inibição do sistema pelo acúmulo de ácidos graxos voláteis (YANG et al., 2018). A concentração inibitória inicial de nitrogênio total amoniacal para condições mesofílicas citadas na literatura ficam entre 3000 e 4000 mg L⁻¹ (NIU et al., 2014).

Estudos realizados na North Carolina State University (NCSU) em 2003 revelaram valores de umidade de 20,9%; Nitrogênio 3,3%; P₂O₅ 3,5%; Potássio 2%; Cálcio 1,86%; Cobre 200 (ppm); Zinco 290 (ppm); e Ferro 590 (ppm) – (Valores com base na matéria seca). Para a região sudoeste do Paraná, Tessaro (2011) encontrou os seguintes valores:

Nitrogênio (26,6 g Kg⁻¹); Fósforo (13,6 g Kg⁻¹); Potássio (26,3 g Kg⁻¹); Cálcio (23,6 g Kg⁻¹) e umidade 25%.

Com relação à quantidade de CF gerada, Santos e Lucas Jr. (2003) mencionam que em média cada frango abatido produziu 2,19 kg de cama na matéria natural (considerando apenas dois lotes de criação). Somente em 2016 foram abatidos em frigoríficos com inspeção federal, estadual ou municipal 5,79 bilhões de frangos, o que geraria aproximadamente 12,68 bilhões de kg de CF.

Em relação ao destino deste material, na região sul do Brasil, este é comumente utilizado como condicionador do solo sem nenhum tipo de tratamento prévio antes de sua utilização. Contudo, para que se possa utilizar a cama de frango como fertilizante orgânico é necessário conhecer o tipo de solo, devendo haver uma atenção especial em solos arenosos e com maior declividade, onde há um maior risco de lixiviação do nutrientes ainda presentes na cama, podendo contaminar corpos hídricos, também havendo a possibilidade da excessiva concentração de P na superfície do solo. Desta forma, se utilizado sem critérios técnicos, o seu uso poderá provocar redução na produtividade agrícola e impactos negativos ao ambiente.

3.3 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) é uma das alternativas para a estabilização da cama de frango que pode diminuir o risco de contaminação ambiental e ainda recuperar o potencial energético contido no material.

Este processo ocorre em câmaras fermentativas chamadas biodigestores, que transformam o material orgânico complexo, por meio de transformações mediadas por microorganismos, em dois produtos: o biogás composto basicamente por metano, gás carbônico e uma pequena quantidade de outros gases, e o biofertilizante, um líquido rico em nutrientes que pode ser utilizado como adubo. Este processo ocorre em quatro fases sequenciais: 1) Hidrólise: fase em que substâncias maiores são quebradas em moléculas menores e menos complexas, esta fase irá determinar a velocidade da digestão anaeróbia como um todo, podendo levar de horas, como para açúcares mais simples, até semanas, no caso de lipídios ou substâncias recalcitrantes, como a lignina; 2) Acidogênese: fase em que os produtos da hidrólise são absorvidos, metabolizados e liberados na forma de substâncias ainda mais simples, como ácidos graxos voláteis, álcoois e outros compostos minerais, nessa fase pode ocorrer acúmulo de ácidos graxos voláteis, dependendo da velocidade de consumo e produção destes, o que pode levar à acidificação do meio, podendo levar o sistema todo ao colapso; 3) Acetogênese: nesta fase os produtos da acidogênese são transformados principalmente em acetato, CO₂ e H₂ por meio de reações endotérmicas mediados por dois grupos de bactérias, as sintróficas acetogênicas e as homoacetogênicas; 4) Metanogênese: nesta fase ocorre a formação do metano, que pode ser pela

descarboxilação do acetato, realizada por arqueas metanogênicas acetotróficas ou pela redução do CO₂ pelo H₂ realizada por bactérias metanogênicas hidrogenotróficas (FORESTI et al., 1999; JAIN et al., 2015; BHARATHIRAJA et al., 2016; KUNZ; AMARAL; STEINMETZ, 2016).

Por ser um processo mediado por microorganismos, torna-se necessário observar ou até mesmo controlar alguns parâmetros para que as transformações necessárias ocorram de forma eficiente sem prejudicar o desempenho do processo. Dentre os principais parâmetros pode-se citar: temperatura, nutrientes, relação C/N, teor de sólidos, ácidos voláteis, alcalinidade, pH e inóculo.

Para compreender melhor o processo de DA, ensaios para determinar o potencial bioquímico de metano seguindo as normas da Associação Alemã de Engenharia – Verein Deutscher Ingenieure (VDI) vêm sendo realizados. A VDI 4630 está sendo utilizada por diversos pesquisadores, já que esta torna possível a comparação de resultados obtidos a partir da DA de diferentes substratos e em diferentes regiões do globo.

Esta normatização estabelece uma série de critérios a serem respeitados com relação a equipamentos e materiais utilizados nos testes de DA para os materiais orgânicos. Os testes de batelada são realizados em escala de bancada com condições controladas e podem fornecer informações sobre o potencial de produção de biogás e a degradação biológica de um ou mais materiais orgânicos. Além disso, pode-se inferir sobre a velocidade de degradação do substrato e investigar possíveis efeitos inibitórios do material em estudo.

Para a realização dos testes é necessário garantir a obtenção de um inóculo de qualidade. Para assegurar que isso ocorra, a norma determina que o inóculo utilizado deve conter uma concentração de sólidos voláteis maior que 50% dos sólidos totais, sendo que a quantidade de substrato não deve superar a quantidade de inóculo ($SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}} \leq 0,5$). A produção de biogás a partir do substrato deve ser, no mínimo, 80% maior do que a contribuição do inóculo e a concentração de sólidos no teste de batelada não deve exceder 10%. Para assegurar a atividade do inóculo anaeróbio utilizam-se materiais com capacidade de produção de biogás conhecida. O material mais utilizado é a celulose cristalina, que produz entre 740 e 750 mLN/gSV_{adic}. Esses valores devem ser recuperados em no mínimo 80% em um teste controle. Atingindo esse valor de recuperação, garante-se que o inóculo possui atividade biológica satisfatória e é adequado para realização de testes de BMP.

O material a ser degradado deve ser mantido em condições mesofílicas (37 ± 2 °C) e os testes devem ser realizados no mínimo em duplicata. Antes de iniciar o teste deve ser injetado nitrogênio para realizar o arraste de gases presentes no reator. Durante o teste deve-se garantir que o material esteja homogeneizado, o que pode ser feito agitando-se os frascos diariamente. A quantidade de biogás produzida deve ser mensurada frequentemente para assegurar que a formação de gás seja reconhecida. O teste pode ser encerrado assim

que a produção de biogás for menor que 1% do volume total de biogás produzido (VDI 4630, 2006).

A norma da VDI também é usada como referência para realização de ensaios devido à maior facilidade em controlar o processo, menor quantidade de espaço e material necessário para sua realização, o que pode ser de grande utilidade para realizar estudos com um número elevado de tratamentos. Amaral et al. (2016) determinaram o potencial bioquímico de metano das diferentes frações de dejetos suíno dentro das normas estabelecidas pela VDI e concluíram que as diferentes frações apresentam diferentes rendimentos de biogás e metano, sendo a fração sobrenadante a que apresentou maior biodegradabilidade da matéria orgânica dentre as demais frações estudadas e alcançou maiores rendimentos de biogás e metano ($0,406 - 1,157 \text{ m}^3_{\text{biogás}} \cdot \text{kgSV}^{-1}$). Chaump et al. (2018), trabalhando com potencial bioquímico de metano da cama de frango encontraram diferentes potenciais para diferentes frações testadas.

Devido à CF possuir um alto teor de fibras de difícil degradação que podem tornar o processo de digestão anaeróbia mais difícil, aumentar o tempo de retenção hidráulica e causar o assoreamento dos biodigestores, a lignina presente em grande parte dos substratos utilizados como cama de frango protege a celulose e a hemicelulose de sofrerem o processo de hidrólise, aumentando, assim, a recalcitrância destes polissacarídeos, o que pode limitar a taxa de degradação e ser um passo limitante à sequência do processo de digestão anaeróbia (SHRESTHA et al., 2017). Somado a este fator, a composição da cama de frango pode levar a problemas associados à inibição causada pela amônia (ABOUELENIEN et al., 2014), pois a decomposição das proteínas e da ureia contida nos dejetos pode levar a uma grande produção de amônia e íons amônio que podem ser tóxicos aos microorganismos atuantes no processo de DA. Apesar dessa dificuldade, vários estudos utilizando a cama de frango como fonte de biomassa para a produção de energia por meio da digestão anaeróbia já foram realizados, obtendo valores que variam entre 0,14 e 0,37 L CH_4 /g SV adicionados (COSTA et al., 2012; NIE et al., 2015).

A separação das frações é uma alternativa para minimizar este problema. Vários autores recomendam a separação da fração sólida antes do resíduo ser destinado ao processo de DA para melhorar sua eficiência, obtendo assim maior produção de biogás por kg de sólido adicionado e diminuindo o tempo de retenção hidráulica (MOLLER et al., 2004; WEN et al., 2007).

Chaump et al. (2018), analisando as diferentes frações da cama de frango, constataram que a fração insolúvel (retida na peneira) possui um teor de sólidos voláteis 40% maior que a fração solúvel (líquida). Apesar disso, a digestibilidade da fração insolúvel foi de 50 a 75% menor que a fração solúvel, pois a fração insolúvel é constituída principalmente por materiais lignocelulósicos e outros constituintes, como ácido úrico, que possuem baixa solubilidade em água. Ao realizar o teste do potencial de produção de biogás,

os valores variaram de 0,08 a 0,13mL CH₄/g SV adicionados para a fração insolúvel, e 0,24 a 0,30 mL CH₄/g SV adicionados para a fração solúvel.

Há várias formas de separar as frações sólida e líquida dos resíduos. As mais comuns são o uso de peneiras de separação, extrusão, tambores rotativos, centrifugação e decantação. A fração líquida possui maior quantidade de nutrientes solúveis, já na fração sólida ficam retidas as frações insolúveis menos degradáveis, como celulose, hemicelulose e lignina (AYRES, 2009).

O fato de a fração sólida possuir um menor potencial de produção de biogás e ser separada não implica que essa fração possa ser descartada do processo, uma vez que a decisão vai depender da eficiência e da rapidez que se necessita para tratar o resíduo. Caso a decisão seja favorável à separação de sólidos, é necessário ter em mente que essa fração ainda tem um poder poluente elevado e necessita de estabilização antes de ser aplicada no meio ambiente. Este tratamento pode ser por via aeróbia, por meio da compostagem ou da vermicompostagem.

Após analisar as características do resíduo e optar pela separação ou não das diferentes frações, caso a decisão seja favorável, a fração que será tratada por meio da DA é de grande importância e se destaca por permitir a reciclagem da energia e dos nutrientes contidos nos resíduos por meio do biogás e biofertilizante, respectivamente (EBNER et al., 2016).

O biogás é definido pelo artigo 3º da Resolução ANP 8/2015 como gás bruto obtido da decomposição biológica de produtos ou resíduos orgânicos (ABIOGAS, 2015). É um combustível renovável composto por aproximadamente 40-75% de CH₄, 15-60% de CO₂, 0,5-1% de H₂ e impurezas (vapor de água, NH₃, H₂S, entre outros elementos traço) (BALMANT et al., 2014), podendo ser utilizado tanto para produção de calor por meio de queima direta como para conversão em eletricidade com auxílio de motogeradores. O conteúdo energético do biogás depende da concentração de metano existente nele. Um metro cúbico de metano puro em condições normais de temperatura e pressão tem um conteúdo energético de 8572,66 quilocalorias. Com isso, 1 m³ de biogás que possui uma concentração de 60% de metano tem um conteúdo energético de cerca de 5159,07 quilocalorias, podendo ser comparado ao conteúdo energético de aproximadamente 0,6 L de Óleo Combustível. O metano é um gás de efeito estufa que se for liberado livremente na natureza produz um impacto negativo 21 vezes pior do que o gás carbônico. Por isso, a simples queima de metano já se caracteriza como um procedimento ambientalmente correto.

Além do biogás, a digestão anaeróbia também origina o biofertilizante, um resíduo da fermentação que contém quantidades significativas de elementos prontamente disponíveis para as plantas, como nitrogênio e potássio, além de fósforo e enxofre, sendo caracterizado como fertilizantes de excelente qualidade, podendo ser utilizado no lugar de adubos minerais. A composição de nutrientes do biofertilizante pode variar muito,

dependendo dos substratos utilizados. Vários autores encontraram resultados positivos do uso do biofertilizante na melhoria das características químicas, físicas e biológicas do solo, além do controle de pragas e doenças (ALFONSO; LEIVA, 2002; DAROLT, 2002; DIAS et al., 2002).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição do local de estudo

A pesquisa foi desenvolvida no anexo do Laboratório de Análises de Resíduos Agroindustriais (LARA), localizado no bloco H da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Cascavel, Paraná.

O município situa-se geograficamente entres as coordenadas 24° 57' 21" S de latitude e 53° 27' 19" W de longitude. O clima predominante da região de Cascavel, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é o Cfa – Clima Subtropical Mesotérmico. Desta forma, os verões são quentes e as geadas pouco frequentes, com tendência de concentração de chuvas no verão e não apresenta estação seca definida. A média de temperatura anual é de 20 °C e a pressão atmosférica média anual é de 936,34 hPa (IAPAR, 2016).

4.2 Cama de frango e inóculo

A cama de frango foi obtida de uma granja de criação de avicultura tipo fomento em parceria com uma cooperativa localizada no município de Guaraniaçú, PR com sistema de criação “all in / all out” de lotes mistos. O material utilizado para base da cama foi de maravalha de pinus e, após o oitavo lote de criação ter passado sobre a mesma cama e as aves terem sido retiradas para transporte e abate, foram realizadas coletas em quatro pontos do galpão por meio de raspagem com auxílio de pás. Em seguida, as amostras foram armazenadas em sacos de rafia para posterior transporte até o local de estudo, conforme pode ser observado na Figura 5, apresentando as seguintes características: 18,27% de umidade, 84,34 ppm de potássio, 16,11 g/kg de fósforo e 3,6% de nitrogênio.



Figura 5 Coleta do material na granja de criação.

O inóculo para o teste do potencial de produção de biogás foi coletado do Centro Internacional de Energias Renováveis no parque tecnológico da ITAIPU, onde é mantido com uma alimentação especial para estar adaptado a todos os tipos de substratos. Logo

após a coleta foi transportado e armazenado em temperatura constante até seu uso no experimento, apresentando 2,34% de sólidos totais, sendo que 65,56% destes eram voláteis.

4.3 Teste de diluição e separação das frações

Para o teste de diluição foram utilizados béqueres com capacidade de 1 litro, nos quais foram adicionadas as amostras de CF e a quantidade de água para diluição conforme apresentado na Tabela 1. Após a diluição, as amostras foram homogeneizadas e em seguida peneiradas em peneira com abertura de malha de 10 mesh. A quantidade de material retido na peneira, assim como o volume de líquido que transpassou, foram medidos para a realização do balanço de massa (Figura 6) e em seguida foi realizada a análise da série de sólidos para determinação da melhor diluição.



Figura 6 Separação de fração.

Tabela 1 Diluições utilizadas no experimento

Diluição	Descrição
1:4	100 gramas de cama para 400 ml de água
1:6	100 gramas de cama para 600 ml de água
1:8	100 gramas de cama para 800 ml de água
1:10	100 gramas de cama para 1000 ml de água
1:12	100 gramas de cama para 1200 ml de água

As diluições utilizadas para o teste foram baseadas em experimentos anteriores com material semelhante.

4.4 Ensaio do potencial bioquímico de metano (PBM)

A determinação do PBM das diferentes frações foi realizada por meio da digestão anaeróbia em batelada a partir dos critérios determinados pela norma VDI 4630 (2006). Para isso, foram utilizados frascos âmbar com capacidade de volume de 500 mL nos quais foram

colocadas as amostras com o inóculo e, em seguida, foram vedados e acoplados a um cateter para posterior medição e retirada do gás produzido, conforme a Figura 7. Para a medição do volume do biogás foi utilizado um manômetro digital juntamente com uma seringa de vidro com capacidade de volume de 100 mL: o gás era retirado com auxílio da seringa até que a pressão interna ao reator e a externa se equiparassem.



Figura 7 Reator para o ensaio do potencial de produção de biogás.

Para cada tratamento foram incubados três reatores contendo inóculo e substrato (diferentes frações das diferentes diluições) e três reatores contendo apenas inóculo, utilizados como teste controle. Três reatores de vidro adicionais foram utilizados para avaliar a atividade biológica do inóculo em paralelo aos demais testes, utilizando celulose microcristalina como amostra de referência.

A composição dos diferentes tratamentos para o teste do PPB pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 Composição dos tratamentos

	Sólidos Totais (%)	Sólidos Voláteis (%)	Massa Substrato (g)	Massa Inóculo (g)	Volume ocupado mL	Relação $S_{V_{inóculo}}/S_{V_{substrato}}$
íntegra 1-6	11,42	72,12	20	280	300	2,6
retida 1-6	30,96	76,04	10	300	310	2,0
líquida 1-6	1,35	47,46	100	200	300	4,8
íntegra 1-8	8,43	67,44	20	280	300	3,8
retida 1-8	29,71	76,78	10	300	310	2,0
líquida 1-8	1,04	48,68	100	200	300	6,1
retida 1-10	7,29	72,05	20	280	300	4,1
retida 1-10	28,67	77,12	10	300	310	2,1
líquida 1-10	1,05	52,52	100	200	300	5,6
celulose	95,18	99,86	2	280	282	
Inóculo	2,34	65,56		280	280	

4.4.1 Monitoramento do biogás

O volume de biogás produzido foi registrado diariamente por um período de 34 dias, além dos dados de temperatura ambiente e pressão atmosférica para padronização às condições normais de temperatura e pressão (CNTP), conforme a equação.

$$V_0 = V \cdot \frac{(P_L - P_W) \cdot T_0}{P_0 \cdot T} \quad \text{Eq. 01}$$

Em que:

V_0 - volume de biogás padronizado (mL);

V - volume de biogás registrado no eudiômetro (mL);

P_L - pressão atmosférica no momento do registro (mbar);

P_W - pressão de vapor da água (mbar);

T_0 - temperatura normalizada (273 K);

P_0 - pressão normalizada (1,013 mbar);

T - temperatura ambiente (K).

A produção de biogás foi monitorada até que o volume diário fosse menor ou igual a 1% do volume acumulado, garantindo assim a estabilização do sistema. A determinação do teor de metano no biogás foi realizada por meio de cromatografia.

4.5 Ensaio semicontínuo

Para a realização do ensaio semicontínuo foi utilizada a fração líquida do tratamento 1:6, em que um reator foi conduzido somente diluindo a CF com água e o outro reator foi conduzido com a utilização de reciclo de 40% do efluente para diluição da cama em substituição à água. Assumiu-se um tempo de retenção hidráulica (TRH) de 25 dias para todos os tratamentos, a partir do momento que suas produções volumétricas diárias de biogás se estabilizassem, atingindo um coeficiente de variação inferior a 5%. Como o volume do reator era de 60 L (Figura 8) e o TRH de 25 dias, definiu-se o volume diário de alimentação de 2,4 L conforme a Tabela 3.

Tabela 3 Alimentação diária durante o ensaio semicontínuo

Tratamento	Cama de frango (g)	Água (mL)	Reciclo (mL)	Total (mL)	Carga utilizada (mL)
Com Reciclo	400	1440	960	2800	2400
Sem Reciclo	400	2400	0	2800	2400

O inóculo utilizado para dar início ao ensaio semicontínuo foi obtido de um biodigestor anaeróbico (Figura 8) de uma unidade de produção de leite, localizada no município de Céu Azul, Paraná. Além de substituir a água limpa e inocular microrganismos anaeróbios, o uso do biofertilizante também foi uma estratégia para fornecer alcalinidade

aos reatores. O biodigestor é do tipo lagoa coberta com agitação mecânica, abastecido em sistema contínuo e recebe as dejeções de vacas leiteiras, cuja alimentação consiste em uma mistura de silagem e concentrado. O biofertilizante coletado foi peneirado em uma malha de 3 mm para reter o material fibroso remanescente.



Figura 8 Biofertilizante utilizado para inocular o substrato nos reatores.

Os reatores de fluxo semicontínuo e seus gasômetros foram confeccionados em tubos de PVC, seguindo modelos existentes no Laboratório de Biodigestão Anaeróbia da UNESP – FCAVJ, cuja ilustração esquemática é apresentada na Figura 9.

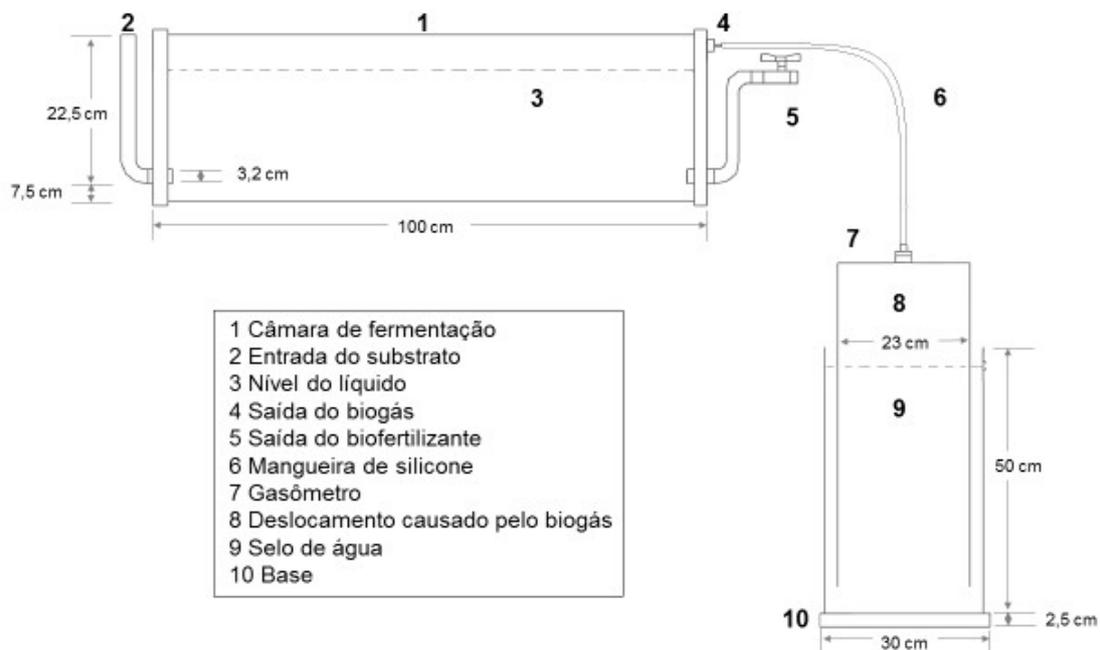


Figura 9 Desenho esquemático da seção transversal do reator modelo semicontínuo.

A partir da estabilização da produção de biogás, foram coletadas amostras do gás (análises cromatográficas instantâneas – uma amostragem por semana) e do digestato (análises físico-químicas posteriores – diariamente) por um período de 25 dias (TRH).

A temperatura foi mantida constante ($35\pm 1^\circ\text{C}$), com o auxílio de uma placa de aquecimento com resistores de níquel-cromo.

Os gasômetros foram confeccionados por dois tubos concêntricos de PVC, sendo o externo com 300 mm de diâmetro preenchido com água e outro tubo com 230 mm de diâmetro, submerso na solução selante com a finalidade de mensurar os deslocamentos causados pelo gás produzido na câmara digestora. Na região externa do gasômetro foi fixada uma régua graduada para auxiliar na determinação dos deslocamentos. Após aferição dos deslocamentos o biogás restante era descartado, esvaziando completamente os gasômetros.

4.6 Métodos analíticos

Para a caracterização físico-química dos substratos (afluentes) e dos digestatos (efluentes) dos tratamentos foram determinados: sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF), determinados pelos métodos gravimétricos, baseados na secagem e ignição da amostra (APHA, 2005). As leituras de pH e CE foram realizadas com um pHmêtro (TECNAL®, modelo TEC-3MP, Piracicaba, SP, Brasil) e um condutivímetro (MS Tecnopon®, modelo mCA 150, Piracicaba, SP, Brasil) de bancada. Para medir o pH das amostras sólidas, foram preparadas soluções aquosas de proporção 1:5 (massa:volume) e agitadas por 30 min (TEDESCO et al., 1995). O Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) foi determinado por meio da digestão das amostras com ácido sulfúrico, seguida da destilação, utilizando o destilador de Kjeldahl e titulação com H_2SO_4 0,0025 mol (APHA, 2005). A determinação do P e K foi realizada mediante a digestão das amostras em solução nítrico-perclórica (3:1) com fonte externa de calor, seguida de diluição e filtração. O P foi detectado via absorvância no comprimento de onda 725 nm por meio do espectrofotômetro (modelo 700 Plus, Femto®, São Paulo, SP, Brasil). O K foi quantificado em fotômetro de chama (modelo DM-62, Digimed®, Campo Grande, SP, Brasil) (MALAVOLTA et al., 1997), na mesma digestão nítrico-perclórica. O carbono orgânico total (COT) foi obtido dividindo a porcentagem de SV por 1,8 (CARMO; SILVA, 2012). A relação C/N foi calculada a partir da razão entre COT e NTK.

A composição do biogás (H_2 , CH_4 e CO_2) foi determinada por meio de um cromatógrafo de gás (modelo CG-2010, Shimadzu®, Kyoto, Japão) equipado com um detector de condutividade térmica (GC/TCD), utilizando argônio como gás de arraste em coluna Carboxen® 1010 Plot (30 m, 0,53 mm). As temperaturas do injetor e do detector foram mantidas a 220 e 230 °C, respectivamente. A coluna foi aquecida a uma taxa de $46^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ até um intervalo de 130 a 135 °C (PENTEADO et al., 2013). A calibração do cromatógrafo foi realizada com gás padrão de biogás contendo $2 \pm 0,02\%$ de oxigênio, $8 \pm 0,1\%$ de nitrogênio, $55 \pm 1,0\%$ de metano e $35 \pm 0,7\%$ de dióxido de carbono; e gás padrão de hidrogênio.

4.7 Análises estatísticas

O delineamento experimental aplicado na fase batelada foi o inteiramente casualizado. As produções de biogás e de metano das diferentes frações foram examinadas mediante a ANOVA e teste de comparação múltipla de médias Tuckey, com 5% de significância, utilizando o software R.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Balanço de massa e separação de fração

A realização do balanço de massa permite a quantificação das diferentes frações, proporcionando, assim, um planejamento adequado do tamanho dos biodigestores baseado na quantidade de resíduo disponível e na diluição utilizada, assim como a estrutura necessária para armazenamento ou tratamento da fração que não será tratada por meio da digestão anaeróbia até sua posterior comercialização ou aplicação como condicionador do solo.

Os dados obtidos após o teste de diluição e o balanço de massa podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 Teste de diluição e balanço de massa

	1:4	1:6	1:8	1:10	1:12
Líquida (g)	262,10 ^d	466,90 ^c	661,50 ^b	855,58 ^{ab}	1058,20 ^a
Retida (g)	237,90 ^d	332,10 ^c	238,50 ^b	244,42 ^{ab}	241,80 ^a
Sólidos totais (%)	15,66	11,43	8,43	7,29	6,51

Nota: Valores médios associados a letras diferentes em uma coluna são considerados significativamente diferentes, de acordo com o teste de Tukey ($p < 0.05$).

Após a realização do balanço de massa, optou-se por descartar a diluição 1:4 devido ao alto teor de sólidos totais e à dificuldade de homogeneização da cama devido a sua consistência pastosa. A diluição 1:12 também foi descartada por ser estatisticamente igual à diluição 1:10. Neste caso, pode-se diminuir os custos com estrutura, tendo em vista que um volume 20% menor seria enviado para dentro do biodigestor. Além disso, proporciona economia de água utilizada para a diluição, diminuindo os custos com a empresa fornecedora ou com eletricidade para bombear a água, caso essa seja proveniente de poço artesiano ou algum reservatório.

As frações selecionadas para a realização do teste do potencial bioquímico de metanol (PBM) após a realização do balanço de massa, assim como seus teores de sólidos totais, voláteis e fixos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 Série de sólidos das diferentes frações

Fração	Umidade (%)	Sólidos totais (%)	Sólidos voláteis (%)	Sólidos fixos (%)
1:6 integra	88,58	11,43	72,13	27,88
1:6 retida	69,04	30,97	76,05	23,96
1:6 líquida	98,65	1,35	47,47	52,53
1:8 integra	91,57	8,43	67,44	32,56
1:8 retida	70,29	29,72	76,79	23,22
1:8 líquida	98,96	1,04	48,68	51,32
1:10 integra	92,71	7,29	72,05	27,95
1:10 retida	71,33	28,67	77,12	22,88
1:10 líquida	98,95	1,05	52,52	47,48

Diferentes frações apresentam diferentes potenciais de produção de biogás. Amaral et al. (2017), trabalhando com a separação de frações de dejetos suínos, observaram que a fração sobrenadante possuiu um maior potencial de produção de biogás quando comparada à fração sólida sedimentada e à fração sólida retida na peneira por apresentar um carbono de mais fácil degradação. A mesma observação foi relatada por Sommer et al. (2015), que, após a separação sólido-líquido, encontraram uma concentração de lignina, celulose e hemicelulose 3,5 vezes menor na fração líquida quando comparada à fração sólida (carbono mais recalcitrante).

5.2 Teste do potencial de produção de biogás

Os valores do teor de metano presente na mistura de biogás variaram entre 55 e 70% durante o ensaio do PPB. Por ser o gás de interesse para produção de energia, seja ela térmica ou elétrica, a produção será apresentada com base no potencial bioquímico de metano (PBM) de cada fração.

Os valores para o PBM das diferentes frações em litros de metano por quilograma de sólidos voláteis adicionados podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 Potencial bioquímico de metano por Kg de sólidos voláteis.

Tratamento	Produção (L CH ₄ /kg SV)	Sólidos totais (%)	Sólidos voláteis (%)
1:6 Líquido	215,96 ^a	1,35	47,47
1:6 Retido	138,45 ^{cd}	30,97	76,05
1:6 Inteira	126,77 ^{cd}	11,43	72,13
1:8 Líquido	189,85 ^{ab}	1,04	48,68
1:8 Retido	156,40 ^{bc}	29,72	76,79
1:8 Inteira	198,28 ^{ab}	8,43	67,44
1:10 Líquido	117,43 ^{cd}	1,05	52,52
1:10 Retido	156,96 ^{bc}	28,67	77,12
1:10 Inteira	103,92 ^d	7,29	72,05

Nota: Valores médios associados a letras diferentes em uma coluna são considerados significativamente diferentes, de acordo com o teste de Tukey ($p < 0.05$).

O maior potencial observado foi para a fração líquida da diluição de 1:6 com valor de 215,96 litros CH₄ / kg SV adicionados, valor superior ao encontrado por Bres et al. (2018), que, trabalhando com a codigestão de cama de frango com resíduos de frutas e vegetais, ao realizar o teste do PPM da CF em monodigestão, obtiveram o valor de 160 L CH₄ / kg SV adicionados; no entanto, este valor foi 31% menor quando comparado à codigestão, fato que pode ser explicado pelo efeito sinérgico da composição dos nutrientes da CF com o resíduo de frutas e vegetais. A codigestão proporcionou uma melhoria da relação C/N, diminuiu a concentração de nitrogênio na mistura, além de contribuir com uma fonte de matéria orgânica mais biodegradável (75% da MS são açúcares e hemicelulose) quando comparado à CF em monodigestão (GELEGENIS et al., 2007a).

Valores semelhantes aos obtidos nesse trabalho foram encontrados por Chaump et al. (2018), que, trabalhando com a separação da CF, obtiveram PPM de 130 e 290 L CH₄ /

kg SV adicionados para a fração retida na peneira e lixiviada, respectivamente. Miah et al. (2016) observaram PBM de 220 LCH₄ / kg SV adicionados, trabalhando com DA de cama de frangos e de poedeiras.

Apesar da fração retida na peneira apresentar um maior teor de sólidos voláteis (aproximadamente 76%), ela não apresentou um maior PBM, ficando abaixo da fração líquida nas diluições de 1:6 e 1:8. Resultados semelhantes também foram obtidos por Chaump et al. (2018), que, em seu ensaio, apesar da fração sólida (retida na peneira) apresentar um teor de sólidos voláteis 40% superior ao lixiviado (fração líquida), a produção de metano foi de apenas 50% quando comparada à fração solúvel. Isso se deve ao fato de o material utilizado como base da CF ser composto, geralmente, por material com grande quantidade de lignina, a qual não é facilmente degradada pela DA e protege a celulose e a hemicelulose, porções mais digeríveis da degradação (ABDEL-HAMID et al., 2013). Além do material recalcitrante, a fração retida também contém outros constituintes com baixa solubilidade em água, como ácido úrico.

A presença de nitrogênio, aminoácidos e ácido úrico nos dejetos avícolas sob condições anaeróbias pode levar à formação de amônia, o que pode levar à inibição da metanogênese, causando o acúmulo de ácidos graxos voláteis que pode colapsar o sistema como um todo (YANGIN-GOMEZ, 2013; LIU et al., 2015; YANG et al., 2018). Estudos anteriores apontam que, para condições mesofílicas, o sistema se mantém estável até concentrações de 3000 mg L⁻¹ de nitrogênio amoniacal total (TAN); por outro lado, também já foi reportado inibição no processo de DA com concentrações a partir de 1700 mg L⁻¹ (YENIGÜN, 2013).

Um dos principais parâmetros para determinar a toxicidade da amônia é sua combinação com o pH do líquido, o que pode gerar amônia livre, considerada a mais tóxica para os microrganismos atuantes na DA (RAJAGOPAL et al., 2013). Faixas de temperatura e pH elevados favorecem a dissociação do amônio em amônia, sendo esta última a forma mais tóxica de nitrogênio amoniacal devido a sua penetração na membrana celular, causando desequilíbrio celular (MASSÉ et al., 2014).

Mesmo não apresentando diferença estatística significativa a 5% de confiabilidade entre as frações 1:6 líquida, 1:8 íntegra e 1:8 líquida com 215,96; 198,28 e 189,85 L CH₄ / kg SV adicionados, respectivamente, somente a fração 1:6 líquida foi utilizada para o ensaio semicontínuo. Além de apresentar a maior produção numérica, esta diluição também apresentou menor teor de sólidos totais, o que pode diminuir o tempo de retenção hidráulica, diminuindo os custos estruturais para a instalação dos biodigestores. Soma-se o fato das características físico-químicas do resíduo em questão, pois uma maior carga orgânica leva a maiores níveis de nutrientes, particularmente a amônia, que pode levar à inibição do processo (SHEN; ZHU, 2017).

Outro fator importante na tomada dessa decisão foi o fato de que a diluição 1:6 líquida em apenas 14 dias atingiu 75% do total produzido durante os 34 dias de ensaio, enquanto as frações 1:8 íntegra e 1:8 líquida produziram 60 e 70%, respectivamente, o que pode diminuir o tempo de retenção hidráulica por levar somente nutrientes solúveis e, portanto, mais prontamente disponíveis para o processo biológico.

5.3 Ensaio semicontínuo

Para o ensaio semicontínuo foi utilizado o tratamento que apresentou as maiores produções de biogás no ensaio do PPB (fração líquida da diluição 1:6), sendo avaliado o uso de 40% de reciclo proveniente do digestato (efluente) para diluir a CF, em substituição à água.

Os valores de produção obtidos no ensaio semicontínuo podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 Produção fase semicontínua

Tratamento	LCH ₄ / reator dia	LCH ₄ / reator dia
Com Reciclo	36,172 ^b	78,594 ^a
Sem Reciclo	39,511 ^a	83,128 ^a

Nota: Valores médios associados a letras diferentes em uma coluna são considerados significativamente diferentes, de acordo com o teste de Tukey ($p < 0.05$).

Observando a Tabela 7, pode-se verificar que o uso do reciclo não comprometeu a produção de biogás. Levando em consideração os quilogramas de sólidos voláteis adicionados, o teor de metano ficou entre 55 e 65% para os dois tratamentos, não diferindo estatisticamente. Pode-se inferir que seu uso foi benéfico, pois, além de não prejudicar a produção propiciou uma redução de 40% na utilização de água limpa para diluição da CF, diminuindo, assim, os custos de produção, além de fornecer um biofertilizante mais concentrado. O uso do reciclo também propicia o retorno ao meio de uma gama de microrganismos adaptados além de alcalinidade, que têm um importante papel tamponante, diminuindo o risco de acidificação do sistema (RIPPLEY; BOYLE; CONVERSE, 1986; CHERNICHARO, 1997).

Damaceno et al. (2019), trabalhando com a codigestão de batata doce com lodo de flotor (proveniente do abate de frangos de corte), observaram que a utilização de 60% de reciclo do digestato para confecção de suas cargas afluentes alcançou valores de produção de 0,55 m³ CH₄ kg SV. Apesar disso, em alguns tratamentos houve uma inibição parcial, produzindo 0,27 m³ CH₄ kg SV, o que pode ser decorrência de um curto tempo de retenção hidráulica (SALMINEN; RINTALA, 2002), aliado ao fato da recirculação de 60% do volume de saída do reator. Isso ocorre porque substratos lipídicos, como o lodo, geralmente apresentam característica hidrofóbica e hidrólise mais demorada (SALMINEN; RINTALA,

2002; JAIN et al., 2015), fato que não foi observado neste estudo, em que a recirculação não influenciou negativamente a produção.

A diferença observada quando se compara a produção baseada nos sólidos totais adicionados pode ser explicada pelo fato de que, com a utilização do reciclo, uma quantidade de matéria orgânica mais recalcitrante que já passou pelo biodigestor e não foi digerida durante o TRH está sendo reinserida no reator, o que aumenta a concentração destes sólidos no meio. Entretanto, a adição deste material não influencia na produção de biogás, tendo em vista que não é passível de ser degradada no processo, o que pode ser observado na eficiência de redução de sólidos, que foi de 47,71 e 54,81% para os tratamentos com reciclo e sem reciclo, respectivamente.

Uma das principais fontes de recalcitrância presentes na CF é a lignina, que para ser degradada necessita de um sistema complexo de enzimas denominado ligninases, que atuam principalmente nos grupos metoxi (-OCH₃) e éster (-C-O-C), causando degradação parcial da sua estrutura e formação de produtos mais solúveis. Posteriormente, deve ocorrer a ruptura do anel aromático, que é realizado em várias etapas e por enzimas mais especializadas. Esta complexidade do ataque e produtos de degradação é uma das razões da recalcitrância da molécula de lignina (FERRAZ, 2004).

5.4 Biofertilizante

Foram realizadas análises químicas no material de entrada e no digestato (biofertilizante) durante o ensaio semicontínuo para determinação dos nutrientes básicos considerados na adubação: nitrogênio, fósforo e potássio (N, P, K), para verificar a influência da utilização do reciclo na concentração final do biofertilizante. Os dados podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 Análises químicas

	UMI %	ST %	SV %	SF %	K ppm	P g/kg	NTK%
Cama in natura	18,27	81,73	45,19	54,81	84,38	16,11	3,60
Entrada com reciclo	98,47	1,53	37,12	62,88	76,22 ^A	15,90 ^A	3,51 ^A
Entrada sem reciclo	98,65	1,35	42,83	57,17	71,22 ^A	13,31 ^A	2,33 ^B
Biofertilizante com reciclo	99,20	0,80	21,60	78,40	74,89 ^a	13,18 ^a	2,35 ^a
Biofertilizante sem reciclo	99,39	0,61	24,03	75,97	69,27 ^a	12,45 ^a	1,87 ^b

Nota: Valores médios associados a letras diferentes em uma coluna são considerados significativamente diferentes, de acordo com o teste de Tukey ($p < 0.05$). Letras maiúsculas e minúsculas comparam entrada e saída respectivamente.

A DA produz além do biogás o biofertilizante que pode ser utilizado em substituição ao adubo mineral em culturas agrícolas, hortaliças ou florestais. O uso do biofertilizante já foi relatado em diversas culturas, como alface (RONGA et al., 2019), arroz (KHAN, 2018), trigo (SIMON et al., 2015), milho (MAUCIERI et al., 2016) e cana-de açúcar (MENDONÇA et al., 2018).

O biofertilizante pode ser utilizado para melhorar as condições físico-químicas e biológicas do solo, reduzindo a aplicação de fertilizantes minerais no solo (DAMACENO, 2019), podendo ainda, no caso de pequenas propriedades sem espaço agricultável, se tornar uma fonte de renda alternativa por meio da sua comercialização (DU et al., 2018). Os tratamentos não apresentaram diferença estatística significativa para os parâmetros avaliados, exceto para o N, que tanto no material de entrada quanto no biofertilizante apresentou maior concentração com o uso do reciclo. Pode-se inferir que a utilização do reciclo introduz no reator uma porcentagem de N que não influenciou negativamente os microrganismos atuantes na DA pelo período observado durante o experimento (dois TRHs).

Por ser o N um dos nutrientes de maior demanda para grande parte das culturas, estes resultados corroboram para a utilização de 40% de reciclo em substituição à água limpa para a diluição da CF. O nitrogênio é crucial para as plantas, uma vez que está presente em biomoléculas (ATP, NADH, NADPH, clorofila, proteínas e inúmeras enzimas) responsáveis pelo crescimento, desenvolvimento e produtividade dos vegetais (DEUNER et al., 2008), e, por ser proveniente de um processo anaeróbio, se apresenta nas formas reduzidas, principalmente amônia (NH_3) e amônio (NH_4^+), sendo esta última assimilável pelas plantas.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa e considerando os objetivos propostos, pode-se concluir que:

- A digestão anaeróbia é uma alternativa válida para tratamento da cama de frango, proporcionando recuperação energética e de nutrientes por meio do biogás e do biofertilizante, diminuindo os riscos de passivos ambientais pela utilização inadequada como condicionador do solo.
- O teste de diluição em conjunto com o balanço de massa propiciam informações importantes para o planejamento do uso da CF pelo avicultor. Conhecer o volume da fração líquida facilita o dimensionamento dos biodigestores associado ao tempo de retenção hidráulica, bem como o espaço necessário para armazenamento ou tratamento da fração sólida remanescente até sua utilização ou comercialização.
- A separação das frações é a opção recomendada para os reatores tipo lagoa coberta presentes na grande maioria das propriedades no Brasil, sendo que a fração líquida da diluição de 1:6 apresentou o maior potencial de produção de biogás com baixo teor de sólidos totais.
- A utilização de reciclo no ensaio semicontínuo na proporção de 40% não influencia negativamente a produção de biogás, tornando-se assim uma opção viável para redução da quantidade de água limpa utilizada na diluição da CF, além de propiciar um biofertilizante com maior quantidade de nutrientes.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sugere-se que sejam estudadas alternativas para o tratamento ou o aproveitamento da fração sólida da cama de frango na propriedade ou um ensaio com reatores de mistura completa para testar o aproveitamento da cama de frango sem que seja feita a separação das frações.

Também é sugerido realizar o ensaio semicontínuo com a utilização do reciclo por um período mais prolongado para investigar os possíveis efeitos inibitórios do acúmulo de nitrogênio, principalmente em sua forma amoniacal ou a utilização de diferentes quantidades de reciclo incorporado na diluição da cama de frango.

8 REFERÊNCIAS

- ABDEL-HAMID, A. M.; SOLBIATI, J. O.; CANN, I. K. Insights into lignin degradation and its potential industrial applications. **Advances in Applied Microbiology**, v. 82, p. 1-28, 2013.
- ABIOGAS. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano**. São Paulo: Abiogás, 2015.
- ABOUELENIEN, F.; NAMBA, Y.; KOSSEVA, M. R.; NISHIO, N.; NAKASHIMADA, Y. Enhancement of methane production from co-digestion of chicken manure with agricultural wastes. **Bioresource Technology**, v. 159, p. 80-87, 2014.
- AIRES, A. M. **Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte com ou sem separação das frações sólida e líquida**. 2009. 160f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.
- ALFONSO, E. T.; LEYVA, M. A. P. Biofertilizantes: Alternativa Sostenible para la Producción de Tomate en Cuba. **Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA)**, La Habana, Cuba, 2002. 8p.
- AMARAL, A. C. do; KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; SCUSSIATO, L. A.; TÁPPARO, D. C.; GASPARETO, T. C. Influence of solid-liquid separation strategy on biogas yield from a stratified swine production system. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 229-235, 2016.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- AVILA, V. S. de; MAZZUCO, H.; FIGUEIREDO, E. A. P. de. Cama de aviário: materiais, reutilização, uso como alimento e fertilizante. **Circular Técnica 16**. Concórdia, SC: EMBRAPA-CNPISA, 1992. 38p.
- BALMANT, W.; OLIVEIRA, B. H.; MITCHELL, D. A.; VARGAS, J. V. C.; ORDONEZ, J. C. Optimal operating conditions for maximum biogas production in anaerobic bioreactors. **Applied Thermal Engineering**, v. 62, p. 197-206, 2014.
- BHARATHIRAJA, B.; SUDHARSANAA, T.; BHARGHAVI, A.; JAYAMUTHUNAGAI, J.; PRAVEENKUMAR, R. Biohydrogen and Biogas – an overview on feedstocks and enhancement process. **Fuel**, v. 185, p. 810-828, 2016.
- BILGILI, S. F.; HESS, J. B.; BLAKE, J. P.; MACKLIN, K. S.; SAENMAHAYAK, B.; SIBLEY, J. L. Influence of bedding material on foot pad dermatitis in broiler chickens. **Journal Applied Poultry Research**, v. 18, p. 583-589, 2009.
- BRES, P.; BEILY, M. E.; YOUNG, B. J.; GASULLA, J.; BUTTI, M.; CRESPO, D.; CANDAL, R.; KOMILIS, D. Performance of semi-continuous anaerobic co-digestion of poultry manure with fruit and vegetable waste and analysis of digestate quality: A bench scale study. **Waste Management**, v. 82, p. 276-284, 2018.
- CARMO, D. L. do; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1211-1220, 2012.
- CECCHI, H.M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. Campinas: Editora da Unicamp, 1999.

CHAUMP, K.; PREISSER, M.; SHANMUGAM, S. R.; PRASAD, R.; ADHIKARI, S.; HIGGINS, B. T. Leaching and anaerobic digestion of poultry litter for biogas production and nutrient transformation. **Waste Management**, v. 0000, n. 0000, p. 000-000, 2018.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 1. ed. Vol. 5, Belo Horizonte, MG: SEGRAC, 1997. 379p.

COSTA, J. C.; BARBOSA, S. G.; ALVES, M. M.; SOUSA, D. Z. Thermochemical pre- and biological co-treatments to improve hydrolysis and methane production from poultry litter. **Bioresource Technology**, v. 111, p. 141-147, 2012.

DAMACENO, F. M.; CHIARELOTTO, M.; RESTREPO, J. C. P. S.; BULIGON, E. L.; MENDONÇA COSTA, L. A.; LUCAS JUNIOR, J.; COSTA, M. S. S. M. Anaerobic co-digestion of sludge cake from poultry slaughtering wastewater treatment and sweet potato: Energy and nutrient recovery. **Renewable Energy**, v. 133, p. 489-499, 2019.

DAROLT, M. R. **Guia do produtor orgânico: como produzir em harmonia com a natureza**. Londrina: IAPAR, 2002. 41p.

DEUNER, S.; NASCIMENTO, R. do; FERREIRA, L. S.; BADINELLI, P. G.; KERBER, R. S. Adubação foliar e via solo de nitrogênio em plantas de milho em fase inicial de desenvolvimento. **Ciência Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1359-1365, 2008.

DIAS, P. F.; SOUTO, S. M.; LEAL, M. A. A.; SCHIMIDT, L. T. **Uso de biofertilizante líquido na produção de alfafa**. Documentos 151. Jaguaraiúna: EMBRAPA, 2002.

DU, C.; ABDULLAH, J. J.; GREETHAM, D.; FU, D.; YU, M.; 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.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, p. 350-356, 1956.

EBNER, J. H.; LABATUT, R. A.; LODGE, J. S.; WILLIAMSON, A. A.; TRABOLD, T. A. Anaerobic co-digestion of commercial food waste and dairy manure: characterizing biochemical parameters and synergistic effects. **Waste Management**, v. 52, p. 286-294, 2016.

EDWIGES, T.; FRARE, L. M.; MAYER, B.; LINS, L. P. TRIOLO, J. M.; RIPOLL, X. F.; COSTA, M. S. S. M. Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, v. 71, p. 618-625, 2018.

FERRAZ, A. Fungos: uma introdução a biologia, bioquímica e biotecnologia. In: AZEVEDO, E. **Fungos decompositores de materiais lignocelulósicos**. Caxias do Sul: EDUCS 2004, p. 215-242.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 29-52.

FREITAS, L. A. R. de; BERTOGLIO, O. A evolução da avicultura de corte brasileira após 1980. **Revista Economia e Desenvolvimento**, n. 13, Brasília, DF: RBA Editora, ago. 2001.

FUKAYAMA, E. H. **Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e biofertilizante**. 2008, 99f. Tese

(Doutorado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2008.

GARCIA, R.G.; ALMEIDA PAZ, I. C. L.; CALDARA, F. R.; NÄÄS, I. A.; PEREIRA, D. F.; FREITAS, L. W.; SCHWINGEL, A. W.; LIMA, N. D. S.; GRACIANO, J. D. Effect of the Litter Material on Drinking Water Quality in Broiler Production. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, v. 12, p. 165-169, 2010.

GELEGENIS, J.; GEORGAKAKIS, D.; ANGELIDAKI, I.; CHRISTOPOULOU, N.; GOUMENAKI, M. Optimization of biogas production from olive-oil mill wastewater, by codigesting with diluted poultry-manure. **Applied Energy**, v. 84, p. 646-663, 2007a.

IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do Paraná: Classificação climática**. 2016. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>. Acesso em: 14 jul. 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Culturas temporárias e permanentes**. Produção agrícola municipal, v. 40, p. 1-102, Rio de Janeiro, 2013.

IPARDES. **Leituras regionais: Mesorregião Geográfica Oeste Paranaense**. Curitiba: IPARDES, 2004.

JAIN, S.; JAIN, S.; WOLF, I. T.; LEE, J.; TONG, Y. W. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 142-154, 2015.

KARTHIKEYAN, O. P.; VISVANATHAN, C. Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: a review. **Environment Science Biotechnology**, v. 12, p. 257-284, 2013.

KHAN, H. I. Appraisal of biofertilizers in rice: to supplement inorganic chemical fertilizer. **Rice Science**, v. 25, p. 357-362, 2018.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. 4. ed. Piracicaba: Embrapa, 2004. 173p.

KUNZ, A.; AMARAL, A. C. do; STEINMETZ, R. L. R. **Operacionalização de Biodigestores: Processos Bioquímicos na Digestão Anaeróbia**. Foz do Iguaçu, PR: CIBiogás; Concórdia, SC: Embrapa, 2016. 22p.

LIU, L.; ZHANG, T.; WAN, H.; CHEN, Y.; WANG, X.; YANG, G.; REN, G. Anaerobic codigestion of animal manure and wheat straw for optimized biogas production by the addition of magnetite and zeolite. **Energy Conversion and Management**, v. 97, p. 132-139, 2015.

LUCAS JUNIOR, J.; SANTOS, T. M. B. Aproveitamento de resíduos da indústria avícola para produção de biogás. In: Simpósio sobre Resíduos da Produção Avícola, 2000, Concórdia, SC. **Anais...** Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2000. p. 27-43.

LYNNCH, D.; HEN HAN, A. M.; BOWEN, B.; McDONNELL, K.; KWAPINSKI, W.; LEAHY, J.J. Utilisation of poultry litter as an energy feedstock. **Biomass and Bioenergy**, v. 49, p. 197-204, 2013.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MASSÉ, D. I.; RAJAGOPAL, R.; SINGH, G. Technical and operational feasibility of psychrophilic anaerobic digestion biotechnology for processing ammonia-rich waste. **Applied Energy**, v. 120, p. 49-55, 2014.

MAUCIERI, C.; BARBERA, A. C.; BORIN, M. Effect of injection depth of digestate liquid fraction on soil carbon dioxide emission and maize biomass production. **Italian Journal of Agronomy**, v. 11, p. 6-11, 2016.

MENDONÇA, H. V.; MARTINS, C. G.; ROCHA, W. S. D.; BORGES, C. A. V.; OMETTO, J. P. H. B.; OTENIO, M. H. Biofertilizer replace urea as a source of nitrogen for sugarcane production. **Water Air Soil Pollution**, v. 229, p. 2016-222, 2018.

MOLLER, H. B.; SOMMER, S. G.; AHRING, B. K. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. **Biomass Bioenergy**, v. 26, n. 3, p. 485-495, 2004.

NCSU – NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. **Poultry manure as a fertilizer source**. Biological and Agricultural Engineering. Department, North Carolina State University. Disponível em: <http://ces.soil.ncsu.edu/soilscience/publications/soilfacts/AV-439-05/body.htm>. Acesso em: 15 set. 2017.

NIE, H.; JACOBI, H. F.; STRACH, K.; XU, C.; ZHOU, H.; LIEBETRAU, J. Monofermentation of chicken manure: Ammonia inhibition and recirculation of the digestate. **Bioresource Technology**, v. 178, p. 238-246, 2015.

NIU, Q. G.; HOJO, T.; QIAO, W.; QIANG, H.; LI, Y. Y. Characterization of methanogenesis, acidogenesis and hydrolysis in thermophilic methane fermentation of chicken manure, **Chemical Engineering Journal**, v. 244, p. 587-596, 2014.

PENTEADO, E. D.; LAZARO, C. Z.; SAKAMOTO, I. K.; ZAIAT, M. Influence of seed sludge and pretreatment method on hydrogen Production in packed-bed anaerobic reactors. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 14, p. 6137-6145, 2013.

RAJAGOPAL, R.; MASSÉ, D.I.; SINGH, G. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. **Bioresource Technology**, v. 143, p. 632-641, 2013.

RIPPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength waste. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

RODRIGUES, W. O. P.; GARCIA, R. G.; NÄÄS, I. de A.; ROSA, C. O. da; CALDARELLI, C. E. Evolução da avicultura de corte no Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 1666-1684, 2014.

RONGA, D.; SETTI, L.; SALVARANI, C.; DE LEO, R.; BEDIN, E.; PULVIRENTI, A.; MILC, J.; PECCHIONI, N.; FRANCIÀ, E. Effects of solid and liquid digestate for hydroponic baby leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation. **Scientia Horticulturae**, v. 244, p. 172-181, 2019.

SALMINEN, E. A.; RINTALA, J. A. Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading. **Water Research**, v. 36 p. 3175-3182, 2002.

SHEN, J.; ZHU, J. Methane production in an upflow anaerobic biofilm digester from leachates derived from poultry litter at different organic loading rates and hydraulic retention times. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, p. 5124-5130, 2017.

SHRESTHA, S.; FONOLL, X.; KHANAL, S. K.; RASKIN, L. Biological strategies for enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass during anaerobic digestion: current status and future perspectives. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 1245-1257, 2017.

SIMON, T.; KUNZOVÁ, E.; FRIEDLOVÁ, M. The effect of digestate, cattle slurry and mineral fertilization on the winter wheat yield and soil quality parameters. **Plant, Soil and Environment**, v. 61, n. 11, p. 522-527, 2015.

SOMMER, S. G.; HJORTH, M.; LEAHY, J. J.; ZHU, K.; CRISTEL, W.; SORENSEN, C. G. Pig slurry characteristic, nutrient balance, and biogas production as affected by separation and acidification. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, p. 177-191, 2015.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2. ed. Boletim técnico, 5. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, 1995. 174p.

TESSARO, A. A. **Potencial energético da cama de aviário produzida na região sudoeste do Paraná utilizada como substrato para a produção de biogás**. 2011, 79f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

UBABEF – UNIÃO BRASILEIRA DA AVICULTURA. **Relatório Anual de 2011**. Disponível em: <http://abpa-br.com.br/setores/avicultura/publicacoes/relatorios-anuais/2010>. Acesso em: 11 nov. 2017.

UBABEF – UNIÃO BRASILEIRA DA AVICULTURA. **Relatório Anual de 2013**. Disponível em: <http://abpa-br.com.br/setores/avicultura/publicacoes/relatorios-anuais/2010>. Acesso em: 7 dez. 2017.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM, B. S.; CABRERA, B. R.; MORAES, P. O.; LOPES, D. C. N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Arquivos de Zootecnia**, v.58, p. 59-85, 2009.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science**, v. 74, n. 10, p. 35-83, 1991.

VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 4630. Fermentation of organic materials: characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests**. Berlin, Alemanha: Verein Deutscher Ingenieure, 2006.

VIG, A. P.; SINGH, J.; WANI, S. H.; DHALIWAL, S. S. Vermicomposting of tannery sludge mixed with cattle dung into valuable manure using earthworm *Eisenia foetida* (Savigny). **Bioresource Technology**, v. 102, p. 7941-7945, 2011.

WEN, Z.; FREAR, C.; CHEN, S. Anaerobic digestion of liquid dairy manure using a sequential continuous-stirred tank reactor system. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 82, p. 58-66, 2007.

YANG, Z.; WANG, W.; HE, Y.; ZHANG, R.; LIU, G. Effect of ammonia on methane production, methanogenesis pathway, microbial community and reactor performance under mesophilic and thermophilic conditions, **Renewable Energy**, v. 125, p. 915-925, 2018.

YANGIN-GOMEZ, C.; OZTURK, I. Effect of maize silage addition on biomethane recovery from mesophilic co-digestion of chicken and cattle manure to suppress ammonia inhibition. **Energy Conversion and Management**, v. 71, p. 92-100, 2013.

YENIGÜN, O.; DEMIREL, B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: a review, **Process Biochemical**, v. 48, p. 901-911, 2013.