



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**PALHAS DE MILHO E DE FEIJÃO COMO CO-SUBSTRATOS NA
DIGESTÃO ANAERÓBIA DE ESTERCO BOVINO LEITEIRO**

ENOCK ALVES RABELO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF

MAIO/2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**PALHAS DE MILHO E DE FEIJÃO COMO CO-SUBSTRATOS NA
DIGESTÃO ANAERÓBIA DE ESTERCO BOVINO LEITEIRO**

ENOCK ALVES RABELO

ORIENTADOR: SAMUEL MARTIN

CO-ORIENTADOR: DÉLVIO SANDRI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: 142/2018

BRASÍLIA/DF

MAIO/2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**PALHAS DE MILHO E DE FEIJÃO COMO CO-SUBSTRATOS NA
DIGESTÃO ANAERÓBIA DE ESTERCO BOVINO LEITEIRO**

ENOCK ALVES RABELO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDO AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM AGRONOMIA

APROVADA POR:

SAMUEL MARTIN, Doutor / FAV / UnB / CPF 703.715.800-30

samuelmartin@unb.br

CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO, Doutor/ FAV / UnB / CPF 029.754447-02

cicerocf@unb.br

ARIUSKA KARLA BARBOSA AMORIM, Doutora / ENC / UnB / CPF 826.185.934-72

ariuska@unb.br

BRASÍLIA/DF

MAIO/2018

Rabelo, Enock Alves

Palhas de milho e de feijão como co-substratos na digestão anaeróbia de esterco bovino leiteiro. / Enock Alves orientação de Samuel Martin – Brasília, 2018.

48 f.; il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2018.

1. Biodigestor. 2. Palha de milho. 3. Palha de feijão. 4. Biogás. 5. Esterco bovino leiteiro. I. Martin, S. II. Doutor.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RABELO, E. A. Palhas de milho e de feijão como co-substratos na digestão anaeróbia de esterco bovino leiteiro. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2018, 48 f. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: ENOCK ALVES RABELO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PALHAS DE MILHO E DE FEIJÃO COMO CO-SUBSTRATOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE ESTERCO BOVINO LEITEIRO.

GRAU: MESTRADO

ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Enock Alves Rabelo

CPF: - 048.587.566-70

Endereço: SHPS QUADRA 402 CONJUNTO E CASA 17 – POR DO SOL –CEILÂNDIA/DF

Tel.: 61 –99154-3675

Email: enock.rabelo.agr@mail.com

“Pois o Senhor é quem dá sabedoria; de sua boca
procedem o conhecimento e o discernimento.”

Provérbios 2:6

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Á Deus que nos ilumina e protege sempre.

A minha esposa Veridiane que me acompanha na luta diária, em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais e irmãs sempre no apoio à todas iniciativas da minha vida.

Ao professor Dr. Samuel Martin, pela orientação, dedicação, apoio e amizade.

Aos professores membros da banca examinadora da defesa e da qualificação, Prof. Dr. Jader, Prof. Dra. Ariuska, Prof. Dr. Délvio, Prof. Dr. Cícero Célio, pelas valiosas contribuições.

A Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária– FAV – UNB pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

Aos funcionários do setor de pós-graduação da FAV, sempre me auxiliando e prontos para sanarem minhas dúvidas.

Aos estagiários do LIAA– Laboratório de Instalações Agropecuárias e Ambiente.

Aos meus amigos e primos que sempre estiveram presente minha vida, pelos conselhos e pela ajuda em alguns momentos difíceis pelos quais passei.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Enfim à todos pela ajuda nos experimentos e análises em todos os laboratórios que passei.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Digestão anaeróbia e co-digestão.....	3
2.1.1 Etapas da digestão anaeróbia	5
2.1.2 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia	6
2.1.3 Abastecimento de digestores.....	8
2.1.4 Características do biogás.....	8
2.2 Uso de resíduos agropecuários na digestão anaeróbia	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1 O local, os tratamentos e os ensaios.....	12
3.2 Detalhamento do sistema	14
3.2.1 Condições de leitura.....	16
3.3 Análises do substrato, co-substratos, inóculo, afluente e efluente.....	19
3.3.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)	20
3.3.2 Condutividade Elétrica (CE).....	20
3.3.3 Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV)	20
3.3.4 Carbono Total (C) e Nitrogênio Total (N).....	20
3.3.5 Fósforo (P) e Potássio (K).....	21
3.3.6 Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	21
3.4 Análise da qualidade do biogás.....	21
3.5 Análise estatística.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1 Ensaio e composição quantitativa dos tratamentos	22
4.2 Caracterização dos materiais utilizados nos tratamentos	26
4.3 Caracterização dos tratamentos e do controle.....	28
4.4 Volume de biogás produzido	33

4.4.1 Curvas de produção acumulada de biogás	35
4.5 Qualidade do biogás produzido.....	39
5. CONCLUSÃO	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

RESUMO

O Brasil vem aumentando cada vez mais, ao longo dos anos, sua produção de alimentos e também sua demanda por energia. Conseqüentemente, maior quantidade de resíduos é produzida em diversas atividades, e dentre elas podemos destacar a bovinocultura de leite. O uso destes resíduos agrícolas como fonte de energia é uma alternativa que os produtores podem aproveitar dentro do seu próprio sistema produtivo. Portanto, com a execução deste estudo objetivou-se avaliar o uso de resíduos agrícolas, dentre eles a palha de milho e palha de feijão, como co-substratos em adição ao substrato esterco bovino leiteiro, para produção de biogás em biodigestores de bancada do tipo batelada. O experimento foi realizado no Laboratório de Instalações Agropecuárias e Ambientais (LIAA), da Universidade de Brasília, e os tratamentos compreenderam: Tratamento 1 - inóculo+esterco bovino leiteiro+água (I+EB+A); Tratamento 2 - inóculo+esterco bovino leiteiro+palha de milho+água (I+EB+PM+A); Tratamento 3 - inóculo+esterco bovino leiteiro+palha de feijão+água (I+EB+PF+A). O biorreator contendo apenas inóculo (I) foi chamado de controle. Cada biorreator de capacidade total de 2.000 mL foi composto pelo volume útil de 1.400 mL, onde padronizou-se o teor de sólidos totais nos tratamentos entre 7 e 9%. A quantidade de inóculo adicionada aos tratamentos foi de 280 mL (20%). A quantidade de co-substrato utilizada foi equivalente a 30% do sólido total adicionado, sendo o restante complementado com o substrato (70%). Para totalizar 1.400 mL, utilizou-se água destilada. Foram feitas análises em triplicata do potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), sólidos totais (ST), fixos (SF), voláteis (SV), carbono total (C), nitrogênio total (N), fósforo (P), potássio (K) e demanda química de oxigênio (DQO). Foi também medido o volume de biogás produzido para cada tratamento e feita a análise qualitativa do biogás. Para os tratamentos 1 e 2 observaram-se reduções nos teores de ST, SV e estabilização do pH, resultados estes esperados em função do processo de biodigestão. A produção de biogás foi de 0,29 e 0,27 Nm³/kg ST adicionado para os tratamentos 1 e 2, respectivamente, e a concentração de metano final medida variou entre 60 e 80%, para os tratamentos 1 e 2. Quanto ao tratamento 3, devido a inibição ocorrida no processo de biodigestão e produção de biogás, não foi possível sua comparação com os demais tratamentos. Assim, conclui-se que o co-substrato palha de milho adicionado ao biorreator apresentou potencial de produção e qualidade de biogás semelhante ao biorreator contendo apenas o substrato esterco bovino leiteiro (sem adição de co-substrato), em condições mesofílicas; nas condições experimentais estudadas, o co-substrato palha de feijão não apresentou potencial de produção de biogás, possivelmente dada a condição de pH da palha observada (abaixo do recomendado para sistemas de biodigestão) e a concentração de palha adicionada ao biorreator.

Palavras-chave: Biodigestor, palha de milho, palha de feijão, biogás, esterco bovino leiteiro.

ABSTRACT

Brazil has been increasing, over the years, its food production and also its demand for energy. Consequently, a greater amount of residues is produced in several activities, among which we can highlight milk cattle. The use of these agricultural residues as an energy source is an alternative that producers can take advantage of within their own production system. Therefore, the purpose of this study was to evaluate the use of agricultural residues, such as corn husk and bean straw, as co-substrates in addition to the bovine milk manure substrate, for the production of biogas in bench type biodigesters batch. The experiment was carried out at the Laboratory of Agricultural Facilities and Ambience (LIAA) of the University of Brasília, and the treatments included: Treatment 1 - inoculum + dairy cattle manure + water (I + EB + A); Treatment 2 - inoculum + dairy cattle manure + corn husk + water (I + EB + PM + A); Treatment 3 - inoculum + dairy cattle manure + bean straw + water (I + EB + PF + A). The bioreactor containing only inoculum (I) was called control. Each bioreactor with a total capacity of 2,000 mL was composed by the useful volume of 1,400 mL, where the total solids content in the treatments was standardized between 7 and 9%. The amount of inoculum added to the treatments was 280 mL (20%). The amount of co-substrate used was equivalent to 30% of the total solid added, the remainder being supplemented with the substrate (70%). To complete 1,400 mL, distilled water was used. Analyses were made in triplicate evaluation of hydrogenionic potential (pH), Electrical conductivity (CE), total solids (ST), fixed (SF), volatile (SV), total carbon (C), total nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) and chemical oxygen demand (DQO). The volume of biogas produced for each treatment was also measured and the biogas qualitative analysis was carried out. For treatments 1 and 2, reductions in ST, SV and pH stabilization levels were observed, a result expected given the biodigestion process. The biogas production was 0.29 and 0.27 Nm³/kg ST added for treatments 1 and 2, respectively, and the final measured methane concentration varied between 60% and 80% for treatments 1 and 2. For treatment 3, due to the inhibition occurred in the process of biodigestion and biogas production, it was not possible to compare it with the other treatments. Thus, it was concluded that the co-substrate corn straw added to the bioreactor had potential biogas production and quality similar to the bioreactor containing only the substrate bovine milk manure (without addition of co-substrate), under mesophilic conditions; in the experimental conditions studied, the bean straw co-substrate did not present biogas production potential, possibly due to the pH condition of the straw observed (below the recommended for biodigestion systems) and the straw concentration added to the bioreactor.

Key Word: Biodigester, corn husk, bean straw, biogas, dairy cattle manure.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil vem aumentando cada vez mais, ao longo dos anos, sua produção de alimentos e também sua demanda por energia. Conseqüentemente, maiores quantidades de resíduos são gerados a partir das diversas atividades produtivas, e dentre elas no meio rural pode-se destacar a atividade da bovinocultura de leite. O uso dos resíduos agrícolas desta atividade pecuária pode servir como fonte de energia alternativa aos produtores, reduzindo custos e possíveis danos ao meio ambiente. Também o crescente aumento da produção de grãos no Brasil, a exemplo das culturas do milho e feijão, também gera maior quantidade de resíduos nas lavouras, que por sua vez predominantemente permanecem sobre o solo para decomposição, não acarretando ônus ambientais. Entretanto, partes desta palhada poderá ser aproveitada para incrementar a produção de energia e biofertilizante em sistemas de digestão anaeróbia, a partir da co-digestão. Além disso, hoje a legislação brasileira com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) determina que o produtor é o principal responsável pelo seus resíduos e seu destino final, sendo que este deve sofrer um tratamento prévio antes do seu descarte no ambiente. Estes tratamentos buscam criar condições ideais para que os diversos organismos decompositores presentes na natureza possam degradar e estabilizar os resíduos orgânicos em condições controladas e seguras para a saúde humana. A adoção destes tipos de tratamentos resulta na produção de fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo, promovendo a reciclagem de nutrientes, a proteção do solo contra erosão e perda de nutrientes, conseqüentemente diminuindo a necessidade de fertilizantes. Juntamente com isto, também pode-se destacar a questão de sustentabilidade, onde todo os recursos devem ser aproveitados afim de não comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades.

Dentre as formas de tratamento dos dejetos e resíduos agropecuários utilizadas nas atividades agroindustriais, pode-se destacar a digestão anaeróbia. Neste processo, o material orgânico é degradado em meio anaeróbio à formas mais simples, gerando como produtos finais o biogás e o biofertilizante que podem ser utilizados na própria propriedade.

Atualmente diversos estudos tem utilizado o processo de co-digestão anaeróbia, sendo as vantagens da utilização deste processo a adição de um co-substrato a outro substrato, promovendo um equilíbrio principalmente nos teores de nutrientes necessários para a biodigestão. Muitos tipos de resíduos, pelas suas características, são de difícil degradação por parte dos microorganismos, principalmente pelas arqueias metanogênicas, sendo necessários estudos para se verificar o real potencial de produção de biogás destes resíduos como co-substrato em processos de digestão anaeróbia.

Neste contexto, com este estudo tem-se por objetivo geral avaliar o uso de resíduos agrícolas como co-substrato, em adição ao esterco bovino leiteiro utilizado para produção de biogás, em biodigestores de bancada do tipo batelada.

Os objetivos específicos são:

- Analisar as alterações que ocorrem no efluente, resultado do processo de digestão anaeróbia;
- Avaliar o potencial de produção de biogás utilizando como substrato o esterco bovino leiteiro e como co-substratos a palha de milho e a palha de feijão; e
- Avaliar a qualidade do biogás produzido, a partir da medição de alguns de seus componentes químicos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Digestão anaeróbia e co-digestão

A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos é um processo bioquímico, em ambiente isento de oxigênio, o qual se utiliza de microorganismos para transformar compostos orgânicos complexos em outras substâncias mais simples. Estas, por sua vez, são metabolizadas formando uma mistura de gases, denominado biogás, o qual é combustível e contém principalmente metano e gás carbônico de acordo com MAGALHÃES (1986) e NOGUEIRA (1992). A produção do gás metano na digestão anaeróbia é feita por determinadas espécies de microrganismos naturais metabolicamente ativos, denominados arqueias metanogênicas, em contato com material orgânico em ambiente úmido sem presença do gás oxigênio (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

Nos tratamentos aeróbios, com presença de oxigênio, o processo de digestão da matéria orgânica produz dióxido de carbono, enquanto, na digestão anaeróbia ocorre a produção de gás metano, sendo que devidamente armazenado o metano pode ser comercializado e convertido para créditos de carbono, tornando-se fonte de renda (CUNHA, 2007). Outros benefícios, relacionados a produção de energia, saneamento e fertilidade, são observados com o emprego de digestores anaeróbios em propriedades rurais, em razão que, eles reduzem a população de moscas, diminuem os odores no ambiente, proporcionam a queda da demanda química de oxigênio e de sólidos e, conseqüentemente, os nutrientes contidos no biofertilizante tornam-se mais acessíveis para as plantas (LUCAS JUNIOR e SANTOS, 2000).

De acordo com ARRUDA (2004), nos sistemas de tratamentos anaeróbios os efluentes são o biogás, a biomassa microbiana e o material não degradado, sendo que cerca de 70% a 90% do material orgânico biodegradável é transformado em biogás, cerca de 5% a 15% é convertido em biomassa microbiana e o material não degradado varia entre 10 a 30%. O ponto de partida da digestão anaeróbia em um reator anaeróbio está integralmente relacionado as sequências bioquímicas, sendo as reações bioquímicas responsáveis pelo funcionamento estável e o equilíbrio harmônico entre as diferentes fases/etapas dos processos anaeróbios (MORAES, 2000). A degradação dos compostos orgânicos complexos em biogás e biofertilizantes é resultado da ação das bactérias e arqueias anaeróbias, esse processo é dividido em hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHERNICHARO, 2016 e MORAES, 2000). Ademais, existe uma dependência de outros fatores para que as quatro fases citadas anteriormente ocorram, que devem ser respeitados, caso contrário, podem levar a inativação do sistema anaeróbio, além de que, a perdas dos potenciais energéticos contidos nos efluentes.

A metanização, como é denominada a digestão anaeróbia pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2015), é um sistema que abrange diversas possibilidades na conversão de dejetos e materiais orgânicos em biogás e biofertilizante, e que o biogás em consórcio com

tratamentos apropriados pode ser beneficiado para a geração de energia renovável. Desta forma, é exequível a utilização da digestão anaeróbia na geração de energia pelas fábricas em seus processos industriais, no sentido de perfazer toda ou parte de sua demanda energética, além de fechar o ciclo de produção e consumo, proporcionando a volta dos resíduos e efluentes orgânicos à cadeia produtiva e agregando de forma relevante a sustentabilidade aos processos industriais.

Nesse sentido, as tecnologias de digestão anaeróbia e de aproveitamento do biogás têm-se revelado eficazes no tratamento e valorização de resíduos e na mitigação do efeito estufa, evitando custos ambientais correspondentes ao uso de fontes convencionais de energia elétrica. São relativamente poucos os projetos de aproveitamento do biogás em operação no Brasil em relação à vários países do mundo, com destaque para os Estados Unidos, Canadá e alguns centros europeus.

Por sua vez, a co-digestão pode ser definida como o tratamento anaeróbio de uma mistura de pelo menos dois tipos de resíduos diferentes, com o objetivo de melhorar a eficiência do processo de digestão anaeróbia. Neste sentido, é muito importante estabelecer a melhor mistura para maximizar a produção de metano e evitar processos inibitórios, tornando mais rentável os sistemas de produção de biogás (ALVAREZ et al., 2010).

Já o termo substrato é dado a todo tipo de biomassa que pode ser adequadamente fermentado, e co-substrato é o nome dado as biomassas que são adicionadas para fermentarem em parceria com o substrato. São vários os substratos e co-substratos resultantes da atividade agropecuária brasileira, a exemplo os resíduos da criação de animais e materiais resultantes de pastagens e lavouras.

Em estudo sobre co-digestão, ORRICO et al. (2016) conseguiram obter rendimentos de biogás superiores devido a adição do co-substrato óleo vegetal de descarte, sendo obtido por doação de pastelarias comerciais, após diversas frituras, na proporção de 4,63% nos reatores abastecidos com dejetos de bovinos leiteiros, sendo este rendimento 13% superior ao tratamento sem adição de óleo.

Também de acordo com MATTER (2011), em estudo sobre co-digestão de resíduos de incubatório de aves e resíduos agroindustriais, houve também maior produção de biogás para o tratamento contendo resíduos de incubatório fresco e água residuária da suinocultura.

Já KALAMARAS e KOTSOPOULOS (2014) em estudo de substratos agrícolas alternativos investigados como potenciais substitutos do milho para a produção de biogás, observou que a co-digestão da cama de palha de trigo e esterco bovino tiveram produção de metano similar com a silagem de milho.

2.1.1 Etapas da digestão anaeróbia

Consoante ao que foi citado no tópico anterior, CHERNICHARO (2016) cita que o ciclo da digestão anaeróbia é composto pela hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Os quatro estágios estão esquematizados no diagrama da Figura 1.

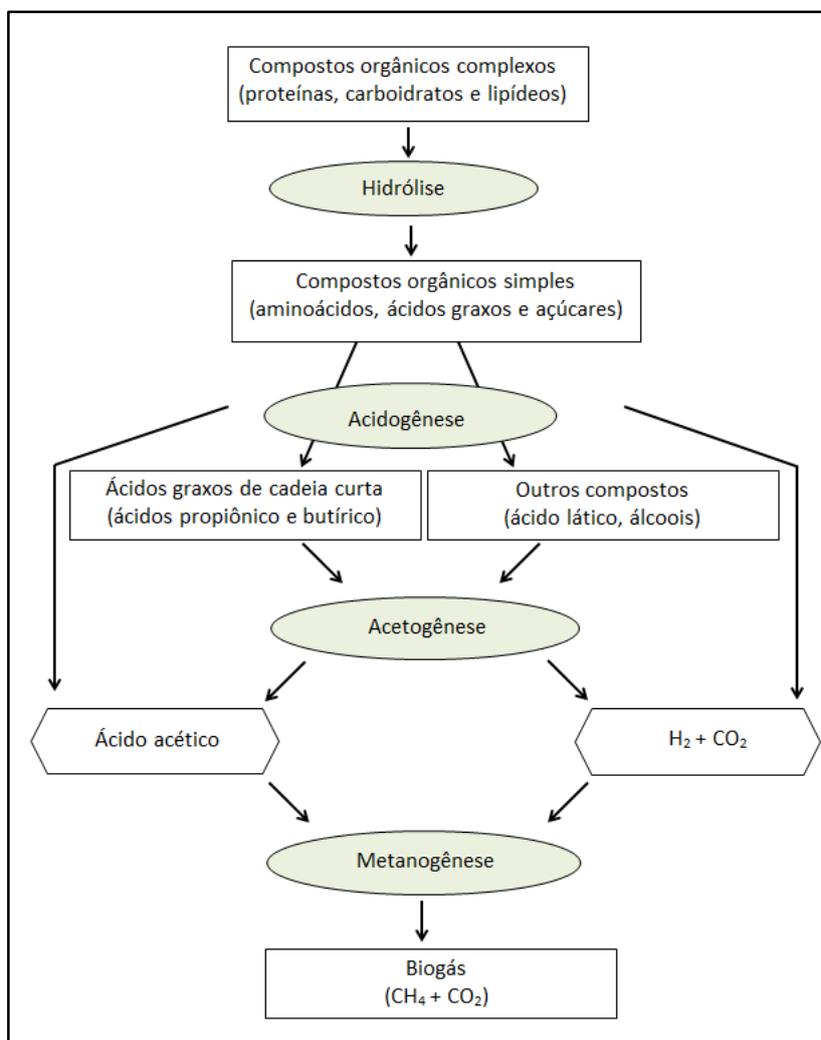


FIGURA 1. Diagrama da digestão anaeróbia, ação dos microrganismos na degradação da matéria orgânica. Adaptado de FRIEHE et al. (2010) e CHERNICHARO (2016).

Conforme também citam DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008), a hidrólise é a fase inicial, na qual compostos não digeridos como celulose, proteínas e as gorduras, são reduzidos em monômeros pela enzima hidrolase das bactérias facultativas e obrigatoriamente anaeróbicas. No entanto, os autores relatam ainda que o processo de hidrólise apresenta tempos e resultados diferentes para cada tipo de composto químico. Por exemplo, a degradação de carboidratos inicia-se em poucas horas, enquanto, a digestão de proteínas e lipídios vai acontecer após alguns dias. A lignocelulose e a lignina não serão completamente digeridas e o processo é mais lento em relação aos outros elementos. Já na segunda fase, chamada de acidogênese, os monômeros produzidos pela hidrólise são absorvidos por diferentes bactérias anaeróbicas facultativas e obrigatórias, elas

degradam estes compostos em ácidos orgânicos de cadeia curta, álcoois, dióxido de carbono e hidrogênio. De acordo com os pesquisadores, a concentração de átomos de hidrogênio carregados eletricamente produzidos intermediariamente afetam os compostos resultantes da digestão anaeróbia, sendo que, quanto mais elevada for a pressão parcial do hidrogênio menor será a redução das estruturas moleculares dos monómeros, a título de exemplo, a produção de compostos como o acetato será favorecida. Na acetogênese, considerada a terceira etapa da digestão anaeróbica, os microrganismos homoacetogênicos, os microrganismos produtores de acetileno e as bactérias acetogênicas consomem H_2 , CO_2 e ácido acético e formam compostos como ácido acético e acetato, além de que, existem nesta fase outras reações espontâneas, tendo como exemplo a oxidação de ácidos graxos de cadeia longa, que é termodinamicamente possível apenas com pressão parcial de hidrogênio muito baixa. Os substratos necessários para os microrganismos desta terceira fase serão providos da acidogênese. Por fim, na quarta e última etapa, chamada de metanogênese, determinados grupos de ácidos, de metilas e de acetatos são digeridos por arqueias metanogênicas e resultam na formação de moléculas de metano, em condições rigorosas de privação de oxigênio. Como nem todos os tipos de ácidos, de metilas e de acetatos são sintetizados pelos os microrganismos da metanogênese, nem todo o substrato disponibilizado é degradado.

2.1.2 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia, por ser um processo de metabolismo microbiano, é influenciado por um conjunto de situações e parâmetros. De acordo com CHERNICHARO (2016) e FRIEHE et al. (2010), os principais requisitos ambientais que influenciam a digestão anaeróbia são: temperatura; pH, alcalinidade e ácidos voláteis; nutrientes; e materiais tóxicos (inibidores). Estes parâmetros também são citados por DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008), os quais ainda citam fatores adicionais, como a concentração de microrganismos, o tipo de substrato, a relação carbono, nitrogênio e fósforo (C/N/P) e a remoção de biogás.

Considerada um dos parâmetros físicos mais importantes da digestão anaeróbia, a temperatura está diretamente relacionada com o processo de crescimento biológico, pois os microrganismos anaeróbios não dispõem de meios para o controle de sua temperatura interna (CHERNICHARO, 2016). Por sua vez, as faixas de temperaturas que podem ser associadas ao crescimento microbiano são a termófila, a mesófila e a psicrófila. A temperatura ótima para a faixa mesófila é entre 32 e 42°C, e para a faixa termófila entre 48 e 55°C, segundo DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008), os quais citam que a maioria dos microrganismos metanogênicos são mesofílicos, sendo poucos termofílicos. Neste contexto, a temperatura de 35°C vem sendo bastante utilizada por pesquisadores em ensaios de digestão anaeróbia, a fim de se avaliar a capacidade geradora de biogás dos mais variados resíduos, a exemplo dos trabalhos de ÁLVAREZ et al.

(2010), ASHEKUZZAMAN e POULSEN (2011), CUETOS et al. (2011) e CREMONEZ et al. (2014).

Em relação ao pH no reator, sua estabilização é de extrema relevância, pois só consegue-se elevadas taxas de metanogênese quando o pH se mantiver numa faixa estreita, embora se consiga a formação de metano com pH variando de 6,0 a 8,0. Porém, valores abaixo de 6,0 e acima de 8,3 devem ser evitados, uma vez que podem inibir, por completo, a atividade das arqueias formadoras de metano (CHERNICHARO, 2016). De acordo com DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008), o pH ótimo para formação de metano pelos microrganismos é entre 6,7 e 7,5. No trabalho de CREMONEZ et al. (2014) sobre co-digestão de água residuária de suinocultura e vinhaça sob diferentes condições térmicas, a mistura dos dois efluentes em determinada proporção garantiu valores favoráveis em relação ao pH, com valor de 7,76. Segundo HENN (2005), o pH adquire, automaticamente, um valor de faixa ótimo no biodigestor, sem que haja necessidade de adição de um alcalinizante, e isto se deve à capacidade de tamponamento do sistema. Entretanto, em casos de sobrecarga do reator, isso não se verifica. No entanto, segundo PIEROTTI (2007) há situações em que ocorre um decréscimo no valor do pH sem sua posterior estabilização, sendo necessária sua correção.

Além do controle da temperatura e do pH, para o bom desempenho do processo de digestão anaeróbia, um sistema deve contar com a presença de alguns nutrientes necessários para que a atividade dos microrganismos seja realizada com sucesso (MORAES, 2005). Os elementos considerados essenciais ao estímulo nutricional das arqueias metanogênicas são o fósforo e o nitrogênio, sendo que o resíduo deve conter concentrações destes componentes em quantidades suficientes para suprir as necessidades das bactérias responsáveis pelo processo de digestão anaeróbia (SOUZA, 1984). Além do carbono, a quantidade de nitrogênio na matéria orgânica é muito importante. A relação carbono/nitrogênio (C/N) ótima situa-se entre 20 e 30 (FRIEHE et al, 2010). DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008) citam valores entre 16 e 25.

A adição de inóculo também é um fator importante no processo de biodigestão, e de acordo com XAVIER e LUCAS JUNIOR (2010), consiste em utilizar parte do material que já passou pelo processo de digestão anaeróbia, capaz de fornecer ao novo substrato uma população adicional de microrganismos típicos, facilitando o início do processo de biodigestão. Além disto, estudos vêm sendo realizados a fim de se determinar a proporção mais adequada de inóculo a ser adicionada nos reatores, a exemplo de XAVIER e LUCAS JUNIOR (2010). Nos trabalhos desenvolvidos por ORRICO JUNIOR et al. (2010) e ORRICO et al. (2016), estes utilizaram a quantidade de inóculo fixa em 15% da massa seca, no abastecimento dos seus biodigestores. Também CUETOS et al. (2011) utilizaram de reatores em duplicata e o branco para determinar a produtividade de biogás do inóculo, e assim promover o respectivo desconto na produção de biogás.

2.1.3 Abastecimento de digestores

O processo de digestão anaeróbia pode ser classificado pela forma como ocorre à alimentação do digestor anaeróbio. As três formas possíveis de abastecer o sistema são: a contínua, a semi-contínua e a descontínua (também denominada batelada). Segundo POSTEL et al. (2010), o processo contínuo é caracterizado pela adição diária de substrato ao reator anaeróbio, assim sendo, ocorre constante digestão do substrato e conseqüentemente, tende o sistema a dispor de produção de biogás de forma contínua.

O formato de abastecimento semi-contínuo é especificado fazendo-se o abastecimento diariamente uma ou mais vezes, porém, a carga de substrato a ser adicionada é introduzida ao reator de maneira fracionada. Já no abastecimento do tipo batelada, que acontece de forma descontínua, os biodigestores são abastecidos com matéria orgânica uma única vez e lacrados para manter as condições anaeróbias, destacando-se que, com o passar do tempo a produção de biogás diminui, tendendo a inativação da digestão em decorrência da decomposição do substrato. Neste caso, o efluente da digestão anaeróbia nestas circunstâncias já pode ser retirado do reator como biofertilizante (SAGULA, 2017).

Neste contexto, de acordo com CHERNICHARO (2016), o volume da mistura deve ocupar de 70 e 90% do volume total do recipiente de reação, ou seja, do reator. YE et al. (2013) na avaliação da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de esterco suíno e da co-digestão de esterco suíno com palha de arroz, utilizaram neste estudo 80% do volume total do recipiente.

2.1.4 Características do biogás

O biogás, ou gás metano, é um gás incolor, altamente combustível, que produz chama azul-clara e é produto final da fermentação anaeróbia de dejetos animais, de resíduos vegetais e de lixo residencial e industrial (COMASTRI, 1981). Ainda segundo este mesmo autor, o biogás é uma mistura gasosa combustível, composta basicamente de dois gases, o metano (CH_4) que representa 60 a 70% da mistura, e o gás carbônico (CO_2), que representa de 40 a 30% do restante, além de outros gases como o gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2), que participam da mistura em proporções menores. Na Tabela 1 são apresentadas algumas características do biogás.

Tabela 1: Composição do biogás (adaptado de FRIEHE et al., 2010)

COMPONENTE	CONCENTRAÇÃO
Metano (CH ₄)	50% a 75% em volume
Dióxido de carbono (CO ₂)	25% a 45% em volume
Nitrogênio (N ₂)	< 2% em volume
Hidrogênio (H ₂)	< 1% em volume
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	20-20.000 ppm
Oxigênio (O ₂)	< 2% em volume
Água (H ₂ O)	2% a 7% em volume

ORRICO JÚNIOR et al. (2010) avaliaram o efeito da dieta a base de milho e sorgo, fornecida para suínos, e observaram que ao final do experimento, com tempo de retenção hidráulica de 120 dias, os teores de metano encontrados foram de 80,1% para a dieta a base de milho e 82,10% para a dieta a base de sorgo, em biodigestores do tipo batelada de volume de 12 litros. Em estudo de AMARAL et al. (2004), com diferentes tipos de biodigestores (modelo chinês e indiano) e tempos de retenção hidráulica com dejetos bovinos leiteiros, observaram teores de metano de 53,66% para o biodigestor indiano e 60,04% para o biodigestor chinês, com 40 dias de tempo de retenção hidráulica.

LI et al. (2013), ao estudar a produção de metano a partir de digestão anaeróbia de resíduos de cozinha, palha de milho e estrume de frango, observaram que a partir dos 11 dias o conteúdo de metano no biogás já chegava a valores de aproximadamente 58%, chegando ao final do experimento com valores entre aproximadamente 60 e 70%.

2.2 Uso de resíduos agropecuários na digestão anaeróbia

De acordo com Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018), os resíduos orgânicos são constituídos basicamente por restos de animais ou vegetais descartados de atividades humanas, tendo diversas origens, como doméstica ou urbana, agrícola ou industrial, e de saneamento básico como por exemplo, lodos de estações de tratamento de esgotos. Estes resíduos são materiais que, em ambientes naturais equilibrados, se degradam espontaneamente e reciclam os nutrientes nos processos da natureza. Porém, a disposição inadequada de resíduos orgânicos gera chorume, emissão de metano na atmosfera e favorece a proliferação de vetores de doenças. Ainda segundo a caracterização nacional de resíduos, publicada na versão preliminar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, os resíduos orgânicos correspondem a mais de 50% do total de resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil. Somados aos resíduos orgânicos provenientes de atividades agrossilvopastoris e industriais, os dados do Plano Nacional de Resíduos Sólidos indicam que há

uma geração anual de 800 milhões de toneladas de resíduos orgânicos. Quando os resíduos orgânicos não são misturados com outros tipos de resíduos, sua reciclagem e sua transformação em adubo ou fertilizante orgânico pode ser feita em várias escalas e modelos tecnológicos, sendo que pequenas quantidades de resíduos orgânicos podem ser tratadas de forma doméstica ou comunitária, enquanto grandes quantidades podem ser tratadas em plantas industriais. Os processos mais comuns de reciclagem de resíduos orgânicos são a compostagem e a digestão anaeróbia. Tanto a compostagem quanto a biodigestão buscam criar as condições ideais para que os diversos organismos decompositores presentes na natureza possam degradar e estabilizar os resíduos orgânicos em condições controladas e seguras para a saúde humana. Assim, a adoção destes tipos de tratamento resulta na produção de fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo, promovendo a reciclagem de nutrientes, a proteção do solo contra erosão e perda de nutrientes e diminuição da necessidade de fertilizantes minerais (MMA, 2018).

Neste contexto, o desenvolvimento agrícola sustentável deve ser iniciado tendo por base o planejamento da implantação da atividade e do manejo correto dos dejetos ali gerados, usando-se de estratégia de crescimento a partir da reciclagem dos resíduos. Conforme citado por COSTA (2009), para destinar adequadamente os resíduos, os produtores devem possuir um programa racional de controle dos dejetos, visando a sua correta utilização para evitar os problemas de poluição. Por outro lado, os resíduos gerados nas atividades ligadas a produção animal, apesar dos problemas ambientais que podem causar, apresentam valor energético, podendo significar um fator de agregação de valor econômico na propriedade. Dessa forma, encontrar uma maneira adequada para o manejo dos dejetos e ou resíduos é um desafio, para reduzir os custos de produção e minimização dos impactos ambientais. Para a FEAM (2015), a promoção da gestão adequada dos resíduos e efluentes gerados nos processos produtivos é um dos principais desafios enfrentados pela sociedade moderna. Dentre os diversos tipos de resíduos e efluentes gerados, aqueles compostos por materiais orgânicos têm se destacado como uma significativa fonte de contaminação ambiental, pois, quando não são tratados de forma adequada, tornam-se uma relevante fonte de contaminação do solo e corpos hídricos, proliferação de vetores e doenças, geração de maus odores e emissão de gases causadores do efeito estufa. Ainda segundo este mesmo autor, são vários os substratos e co-substratos disponíveis para digestão anaeróbia provenientes da pecuária e agricultura brasileira, principalmente os resíduos da criação de animais e das lavouras. De uma forma geral, todo resíduo ou efluente orgânico pode ser direcionado a um sistema de metanização, visando a sua valorização energética (FEAM, 2015).

No Brasil a produção de leite é comum em todas as suas regiões, sendo que em quase todas as propriedades rurais existe esta atividade, seja ela uma atividade econômica ou de subsistência. De acordo com FRIEHE et al. (2010), o esterco líquido de origem bovina é ideal para o uso em

usinas de biogás em função da sua bombeabilidade e fácil armazenamento em tanques, e também devido ao seu baixo teor de matéria seca, podendo ser facilmente combinado com outros materiais (co-substratos). Nos trabalhos de AMARAL et al. (2004), XAVIER e LUCAS JUNIOR (2010) e também ORRICO et al. (2016), foram utilizados dejetos de bovinos leiteiros nos processos de biodigestão anaeróbia, para diferentes condições de estudo.

As culturas do milho e feijão por sua vez tem relativa importância na região Centro Oeste brasileira, sendo cultivadas tanto entre os pequenos como entre grandes produtores. Assim, a quantidade de palha disponível nas lavouras é bastante elevada, embora a maioria destes produtores utiliza-se destas palhas como material de cobertura nas próprias áreas de cultivo, para proteção do solo.

Em trabalho desenvolvido por ZANATTA (2011) sobre a produção de metano usando cama de aviário com vistas a suprir as necessidades energéticas do período de aquecimento de frangos de corte, foi utilizado como substrato cama de aviário, palha de trigo, palha de centeio e esterco de galinhas poedeiras, em experimento em biodigestores tipo batelada. Pelos resultados foi possível observar que a palha é um ótimo material para ser misturado à cama de aviário e ao esterco, por conter pouco nitrogênio, proporcionando uma melhor relação C/N, além de outros elementos importantes no processo de digestão anaeróbia. FRIEHE et al. (2010) cita a utilização do milho como um substrato muito utilizado em usinas de biogás.

A utilização de plantas energéticas ou de palhas para fins de produção de biogás em processos de digestão anaeróbia tem sido alvo de estudo por diversos pesquisadores, com o intuito de fornecer uma opção de incremento do potencial gerador de energia, conforme citam trabalhos de ZANATTA (2011) e IBRAHIM et al. (2017), onde foram utilizadas palhas de trigo e bagaço de cana-de-açúcar, em seus trabalhos, respectivamente. Já em outras pesquisas, LI et al. (2013) e CUETOS et al. (2011) utilizaram de resíduos da agricultura, como palha de milho, girassol e colza. Já KALAMARAS e KOTSOPOULOS (2014) em estudo de substratos agrícolas alternativos investigados como potenciais substitutos do milho para a produção de biogás, avaliaram, dentre os substratos estudados, esterco bovino e silagem de milho.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 O local, os tratamentos e os ensaios

O experimento foi conduzido no Laboratório de Instalações Agropecuárias e Ambiente - LIAA/FAV, no Campus Universitário Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Análises também foram realizadas nos Laboratórios de Análise de Água e no Laboratório de Química do Solo, da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, assim como no Laboratório de Saneamento Ambiental, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

O sistema foi constituído de 4 biorreatores de 2.000 mL de volume total cada e volume útil de 1.400 mL, que receberam os tratamentos e o controle de acordo com CHERNICHARO (2016) e YE et al. (2013).

Os tratamentos e o controle foram compostos de:

- Tratamento 1 - inóculo+esterco bovino leiteiro+água (I+EB+A);
- Tratamento 2 - inóculo+esterco bovino leiteiro+palha de milho+água (I+EB+PM+A);
- Tratamento 3 - inóculo+esterco bovino leiteiro+palha de feijão+água (I+EB+PF+A);
- Controle - inóculo (I).

O biorreator com inóculo (I), também chamado de controle, foi utilizado para medir a produção de biogás do mesmo e assim proceder o desconto no volume acumulado de biogás produzido pelos tratamentos, os quais sempre tiveram inóculo adicionado, conforme os trabalhos de ORRICO JUNIOR et al. (2010), ORRICO et al. (2016) e CUETOS et al. (2011).

Foram realizados 3 ensaios, ao longo do tempo, cada ensaio composto pelos 3 tratamentos e o controle, dispostos nos biorreatores por sorteio, conforme apresentado na Tabela 2.

TABELA 2. Períodos de realização dos ensaios e disposição dos tratamentos e do controle nos biorreatores

Biorreator	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
	30/06/2017 à 12/08/2017	01/09/2017 à 04/11/2017	08/11/2017 à 11/01/2018
01	Controle (I)	Trat 2 (I+EB+PM+A)	Trat 1 (I+EB+A)
02	Trat 1 (I+EB+A)	Controle (I)	Trat 2 (I+EB+PM+A)
03	Trat 3 (I+EB+PF+A)	Trat 3 (I+EB+PF+A)	Controle (I)
04	Trat 2 (I+EB+PM+A)	Trat 1 (I+EB+A)	Trat 3 (I+EB+PF+A)

(I) = inóculo; (I+EB+A) = inóculo+esterco bovino leiteiro+água; (I+EB+PM+A) = inóculo+esterco bovino leiteiro+palha de milho+água; (I+EB+A+PF) = inóculo+ esterco bovino leiteiro+palha de feijão+água.

Para cada tratamento padronizou-se obter na mistura final com teor de sólidos totais entre 7 e 9%, em cada biorreator de 1.400 mL, com base em recomendação de COMASTRI (1981), sendo que LUCAS JUNIOR (1994) e AMARAL et al. (2004) utilizaram teores de sólidos totais

em torno de 8%. ORRICO JUNIOR et al. (2010), ao estudar a produção de biogás em biodigestor anaeróbio em batelada, procurou obter teor de sólidos totais iniciais entre 6 e 8%.

O inóculo sempre correspondeu a 20% do volume total do substrato em cada biorreator, equivalente a 280 mL, sendo esta quantidade determinada com base no trabalho de SÁNCHEZ et al. (2001). De acordo com ORRICO JUNIOR et al. (2011), o inóculo tem a função de dar partida inicial ao biorreator e acelerar o processo de decomposição do material em estudo.

A quantidade de co-substrato utilizada foi de aproximadamente 30% do sólido total adicionado, tendo por base o trabalho de ZANATTA (2011), o qual cita que das combinações testadas, a mistura de 74% de ST da cama de aviário e 26% de ST da palha de trigo foi escolhida para o experimento contínuo, porque proporcionou bons resultados de produção de biogás com o uso da cama de aviário. O restante dos sólidos totais foi então complementado com esterco bovino leiteiro, equivalente a 70% do ST adicionado. Para totalizar os 1.400 mL, utilizou-se água destilada.

O esterco bovino leiteiro que foi utilizado nos 3 ensaios sempre foi coletado fresco. Para os ensaios 1 e 3 as amostras foram coletadas na sala de ordenha da Fazenda Água Limpa, área experimental da Universidade de Brasília. Para o ensaio 2 amostras foram coletadas no estábulo da Granja Leiteira Sol Dourado Ltda, no município de Anápolis – GO.

A palha de milho e a palha de feijão foram colhidas no ponto de maturação fisiológica, utilizando da planta toda a parte aérea, que foi seca exposta ao ar ambiente e triturada por triturador forrageiro Marca Vencedora modelo M-674, utilizando-se de peneira de 4 mm, buscando-se obter um material homogêneo e uniforme. As palhas foram retiradas de uma área onde não se utilizou defensivo químico na condução da lavoura, utilizando-se apenas de adubação de plantio. Na Figura 2 são apresentados detalhes do preparo das palhas de milho e feijão.



FIGURA 02. Amostras de palhas: (a) palha de feijão fresca coletada; (b) palha de milho fresca coletada; (c) triturador; e (d) palhas secas ao ar e trituradas.

O inóculo utilizado em cada tratamento, que corresponde ao efluente de um biodigestor em operação, para os ensaios 1 e 3 foi proveniente de estudos anteriores de biodigestão de esterco bovino leiteiro. Já o inóculo utilizado no ensaio 2 foi coletado na Granja Leiteira Sol Dourado Ltda, a qual tem em funcionamento um biodigestor que utiliza como substrato esterco bovino leiteiro, mesmo local onde foi coletado o esterco para a realização do ensaio 2.

3.2 Detalhamento do sistema

O sistema montado para este estudo foi composto por 4 biorreatores de 2.000 mL de volume total cada e volume útil de 1.400 mL. Cada biorreator permanecia ligado a um gasômetro por mangueiras e conexões de $\frac{1}{4}$ " de polegadas, de 1,2 m de comprimento cada, presos com abraçadeiras metálicas. Cada gasômetro foi feito de tubo de PVC de diâmetro de 75 mm e altura de 0,55 m, colocado emborcado no tubo de PVC de 100 mm com altura de 0,65 m, o qual continha

um vertedor na altura de 0,55 m. Dentro do tubo de 100 mm mantinha-se uma solução de água destilada saturada com sal (ZANATTA, 2011), a fim de evitar o desenvolvimento de microorganismos e constituir o selo d'água do gasômetro. Ambos os canos de 75 e 100 mm apresentaram uma de suas extremidades vedadas, sendo que na extremidade do cano de 75 mm manteve-se uma abertura com registro, para descarga do biogás. Um manômetro de coluna d'água em "U" permanecia conectado na mangueira de união do biorreator ao gasômetro, para leitura da pressão interna do sistema.

A medição do volume de biogás produzido entre cada leitura foi determinada a partir do somatório do volume de água deslocado pelo dreno e do volume de biogás medido pelo deslocamento vertical do cano de PVC de 75 mm, multiplicando-se a altura de deslocamento vertical dos gasômetros pela área da seção transversal interna dos gasômetros, de 40,71384 cm². Posteriormente, com a medição da pressão no manômetro de coluna d'água, foi realizada a correção do volume de biogás produzido para as condições de pressão de uma atmosfera e temperatura de 20°C, conforme Equação 01 e de acordo com CAETANO (1985), o qual considera o biogás como comportamento próximo ao de um gás ideal.

$$\frac{V_0 P_0}{T_0} = \frac{V_1 P_1}{T_1} \quad (1)$$

em que

- V_0 = volume de biogás corrigido, Nm³;
- P_0 = pressão corrigida do biogás, 10.322,72 mmca (1 atm);
- T_0 = temperatura corrigida do biogás, 293,15 K (20°C);
- V_1 = volume de biogás medido no gasômetro, m³;
- P_1 = pressão do biogás no momento da leitura (soma da pressão atmosférica local de 8.975,54 mmca + pressão medida no manômetro de coluna d'água em "U", em mmca; e
- T_1 = temperatura do biogás, considerada como sendo a temperatura do ar ambiente, em K.

As medições de volume de biogás produzido foram feitas em intervalos de aproximadamente 1 dia, no início da produção e, após constatar a diminuição na produção a leitura passou a ser feita em intervalos de aproximadamente 2 dias. Em experimento sobre produção de biogás em biodigestores de batelada, de volume de 2.000 mL, ZANATTA (2011) realizou medidas diárias nos primeiros 15 dias, e a cada dois dias no restante do tempo. Este mesmo autor utilizou como critério para interromper o experimento a produção diária de biogás e a produção acumulada de biogás até o momento da última leitura. Caso a produção diária fosse inferior a 1% do total acumulado produzido até o momento, procedia-se a interrupção do experimento. Este mesmo método foi utilizado neste estudo, para finalização de cada ensaio.

A temperatura do ar ambiente foi monitorada por meio de um termômetro de bulbo seco, sendo considerada como a temperatura do biogás, por estar em equilíbrio com o ar ambiente. Já os biorreatores foram mantidos em banho-maria a 35°C, sendo esta temperatura considerada ideal para o desenvolvimento de arqueias metanogênicas, conforme trabalhos de SÁNCHEZ et al. (2001) e CHERNICHARO (2016). Na Figura 3 ilustra-se o sistema descrito.

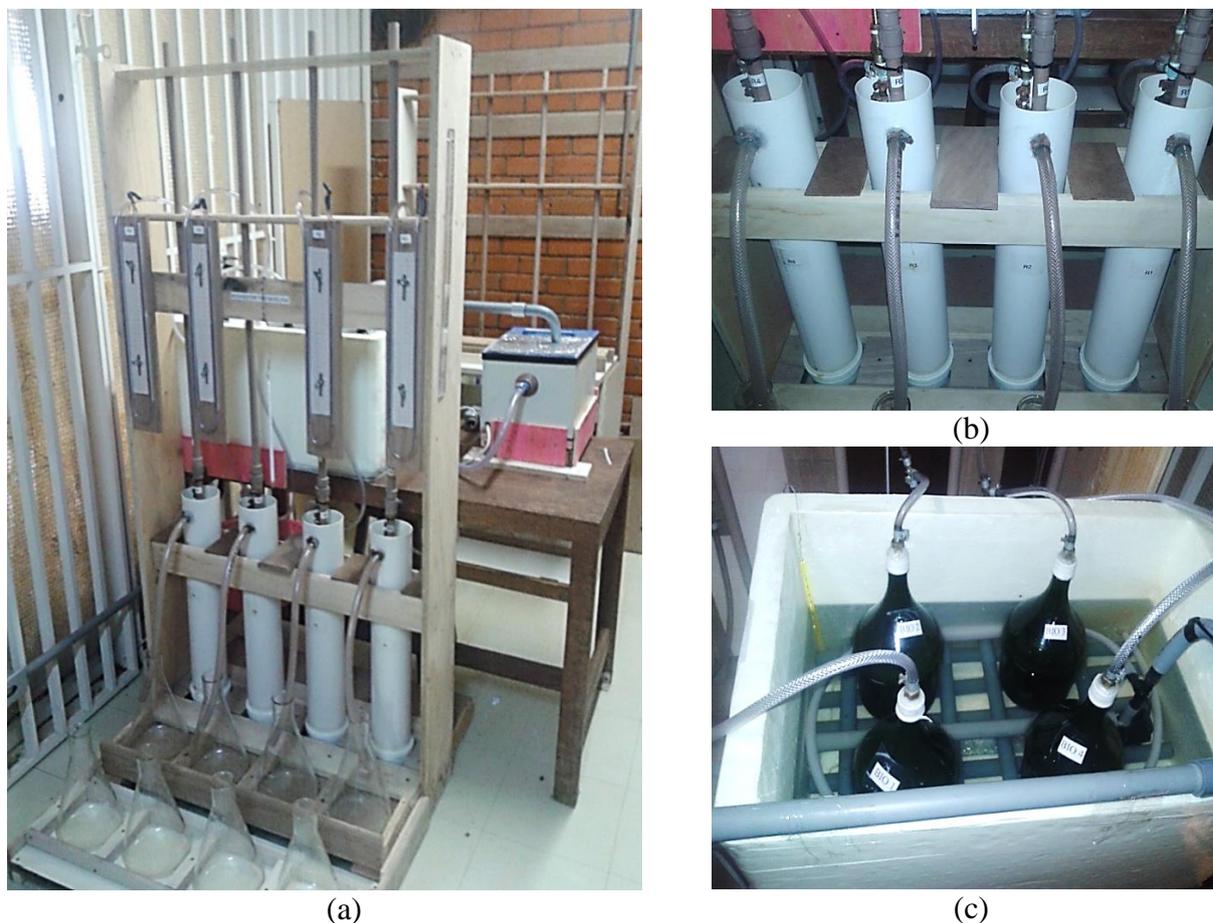


FIGURA 03. Detalhes do sistema biodigestor de bancada utilizado: (a) sistema biodigestor de bancada completo; (b) gasômetros; e (c) reatores de 2 litros em banho maria.

3.2.1 Condições de leitura

Ao longo dos ensaios de digestão anaeróbia, houve a realização de leituras de temperatura, pressão, volume e deslocamento do gasômetro, a fim de se realizar o monitoramento e a quantificação da produção de biogás. Nas Figuras 4 e 5 apresentam-se os componentes que constituem o sistema e também as 3 condições de leitura observadas.

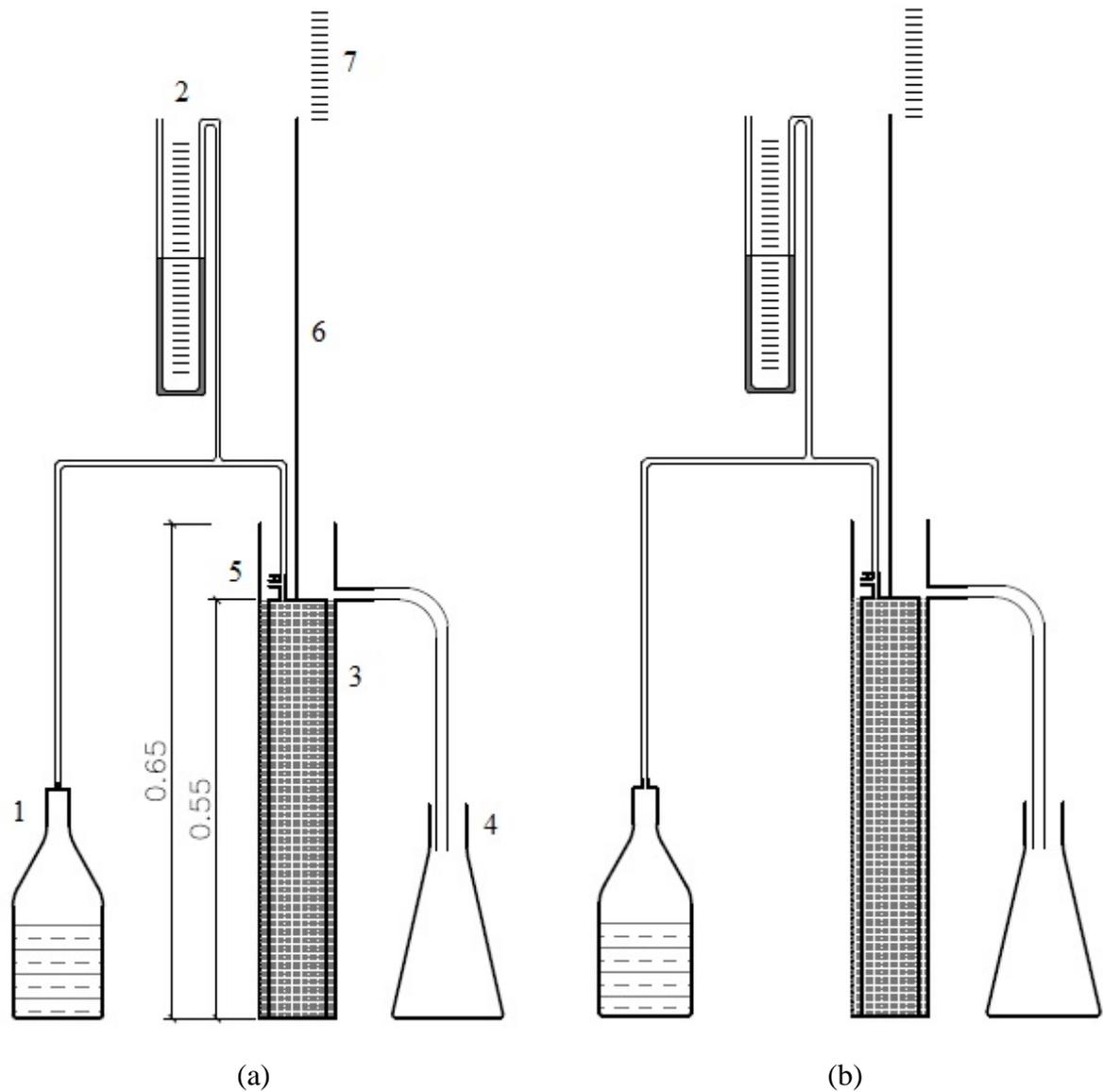


FIGURA 4. Componentes que constituem o sistema e condições de leitura: (a) 1 – biorreator; 2 – manômetro de coluna água em “U”; 3 – gasômetro; 4 – erlenmeyer (reservatório da solução salina drenada); 5 – registro; 6 – guia do gasômetro; 7 – régua para leitura do deslocamento vertical do gasômetro; (b) condição de leitura 1.

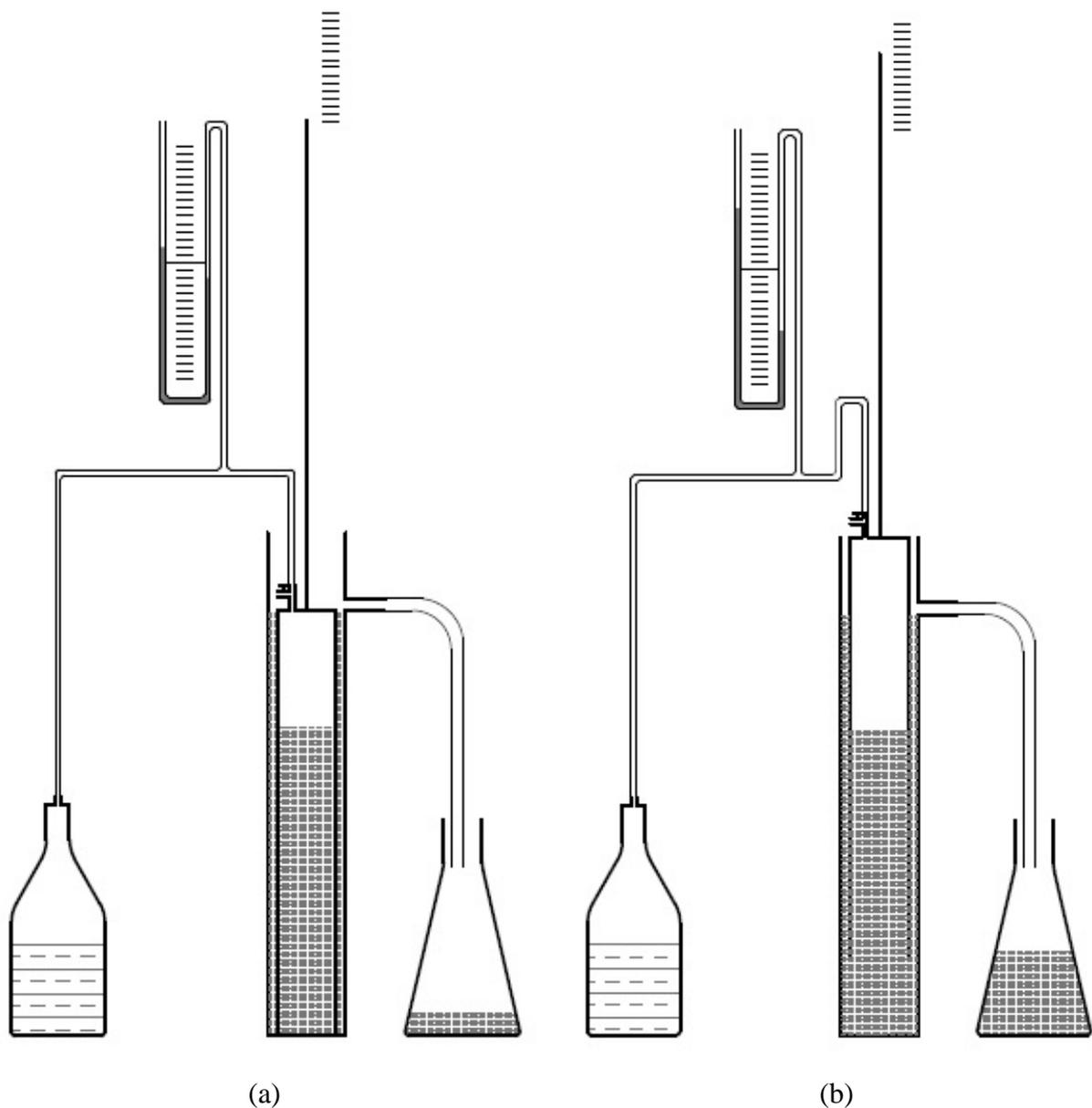


FIGURA 5. Condições de leitura: (a) condição de leitura 2; (b) condição de leitura 3.

a) Condição 1: Sem produção de biogás (momento inicial e momento após o zeramento do sistema para realização de nova leitura).

O sistema encontra-se nesta condição em dois momentos: logo após a montagem do sistema para funcionamento, ou seja, no momento inicial; e logo após o zeramento do sistema para realização de nova leitura de produção de biogás, com a liberação do biogás pelo registro do gasômetro. Nesta condição, o manômetro em “U” encontra-se sem pressão, com o nível de água no zero; com o líquido da solução salina no gasômetro no nível de 0,55 m, correspondente à altura do dreno lateral; e com o erlenmeyer sem solução salina. Nesta condição, não há produção de biogás registrada pelo sistema.

b) Condição 2: Com baixa produção de biogás – registrada pelo aumento de pressão no manômetro em “U” e pelo deslocamento de líquido para o erlenmeyer.

O sistema encontra-se nesta condição logo após iniciado o processo de produção de biogás, com pequeno aumento da pressão interna no sistema. Nesta condição, o manômetro em “U” registra o aumento de pressão no sistema; ocorre também o deslocamento da solução salina pelo dreno lateral do gasômetro para dentro do erlenmeyer. A produção de biogás registrada pelo sistema, é medida a partir do volume de líquido deslocado para o erlenmeyer e sua posterior correção para as condições normais de temperatura e pressão, em função da leitura de pressão no manômetro em “U” e da temperatura ambiente onde encontra-se o sistema. Não há nesta condição deslocamento vertical do gasômetro devido a baixa pressão interna, a qual não é suficiente para promover este movimento vertical.

c) Condição 3: Com alta produção de biogás - registrada pelo aumento de pressão no manômetro em “U”, pelo deslocamento de líquido para o erlenmeyer e pelo deslocamento vertical do gasômetro.

O sistema encontra-se nesta condição após iniciado o processo de produção de biogás, com significativo aumento de pressão interna no sistema. Nesta condição, o manômetro em “U” registra o aumento de pressão no sistema e ocorre o deslocamento da solução salina pelo dreno lateral do gasômetro para dentro do erlenmeyer, sendo esta pressão e o volume de líquido deslocado maiores que os registrados na condição 2; o gasômetro desloca-se verticalmente para cima, indicando maior produção de biogás que a observada na condição 2. Como há produção de biogás registrada pelo sistema, esta é medida pelo somatório do volume de líquido deslocado para o erlenmeyer e do volume de biogás ocupado internamente no gasômetro, levando-se em consideração o deslocamento vertical do gasômetro medido a partir da altura de 0,55 m (altura do nível do dreno) e a área interna do cilindro. Posteriormente foi realizada a correção para as condições normais de temperatura e pressão, em função da leitura de pressão no manômetro em “U” e da temperatura ambiente, onde encontra-se o sistema.

3.3 Análises do substrato, co-substratos, inóculo, afluente e efluente

Para o substrato (esterco bovino leiteiro), co-substratos (palha de milho e palha de feijão) e inóculo, além das amostras do afluente e efluente, logo após a coleta e a homogeneização foram feitas análises em triplicata do potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), sólidos totais (ST), fixos (SF) e voláteis (SV), carbono total (C), nitrogênio total (N), fósforo (P), potássio (K) e demanda química de oxigênio (DQO).

3.3.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

A medição de pH é um dos mais importantes e frequentes testes em química, e foi feita segundo a metodologia descrita por APHA (2012), usando a norma 4500-H⁺. Utilizou-se um potenciômetro de bancada da fabricante GEHAKA, modelo pHmetroPG2000. As amostras de palha foram diluídas em água destilada na proporção 1:10 (m/v). Para as amostras de esterco, afluyente, efluente e inóculo foi feita a leitura direta.

3.3.2 Condutividade Elétrica (CE)

A medida da condutividade elétrica foi feita seguindo-se a metodologia descrita na APHA (2012), usando a norma 2510. Para isto, utilizou-se um condutivímetro microprocessado de bancada do fabricante QUIMIS. As amostras do esterco fresco e de palha foram diluídas em água destilada na proporção 1:10 (m/v). Para as amostras de afluyente, efluente e inóculo foi feita a leitura direta.

3.3.3 Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV)

A determinação dos sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e os sólidos fixos (SF) foi determinada pelo método gravimétrico, de acordo com a metodologia descrita pela APHA (2012), norma 2540. As amostras destinadas as determinações dos teores de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis foram dispostas em cadinhos de porcelana, anteriormente tarados, e pesados para obtenção do peso úmido do material e, em seguida, levadas à estufa com circulação de ar, a temperatura de 105°C, até atingirem peso constante. Em seguida, as amostras foram resfriadas em dessecador e pesadas novamente em balança com precisão de 0,01 g, obtendo-se o peso seco. Para a determinação do teor de sólidos fixos e voláteis, os materiais secos obtidos após a determinação do teor de sólidos totais foram levados a mufla a temperatura de 550°C, durante o período de 1 hora e, após seu resfriamento em dessecador, os materiais foram pesados em balança com precisão de 0,0001 g, a fim de se obter o peso de cinzas, determinando-se os sólidos fixos. Já o teor de sólidos voláteis foi determinado por diferença.

3.3.4 Carbono Total (C) e Nitrogênio Total (N)

As determinações do carbono orgânico total e do nitrogênio foram feitas a partir de amostras secas em estufa a 105°C, por 24 horas, até atingirem peso constante. Posteriormente, amostras de 100mg foram introduzidas em um Analisador Elementar, da fabricante LECO, modelo CN628. Os resultados foram expressos em %.

3.3.5 Fósforo (P) e Potássio (K)

O método utilizado é baseado na digestão total da matéria orgânica com ácido sulfúrico (H_2SO_4) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). A digestão foi efetuada em bloco digestor, com amostras secas em estufa a 105°C (por 24 horas) de aproximadamente 0,05 g, adicionadas de 5 ml de ácido sulfúrico fumegante (H_2SO_4), e mantidas a 250°C no bloco digestor por 3 horas, com posterior repouso por uma hora, para redução da temperatura. Então, foi adicionado 2 ml de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), para finalização da digestão por mais 12 horas, obtendo-se um líquido translúcido composto somente pela fração inorgânica (pois a orgânica deve ter sido completamente digerida).

A partir deste extrato foram determinadas as concentrações de Fósforo e Potássio, conforme VIEIRA e SILVA (2009). Para a determinação do fósforo foi feito uso de um espectrofotômetro da marca Spectrophotometer e Modelo Spectrum SP. 1105 no comprimento de ondas de 660nm, e para o potássio foi utilizado um fotômetro de chama, da marca Micronal e modelo B262.

3.3.6 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Para a análise da DQO foi utilizado um kit da empresa Alfakit, denominado “espectro kit”, em associação a um fotocolorímetro, conforme padrões da metodologia 5220 D, da APHA (2012). As amostras analisadas foram diluídas na proporção de 1:100, utilizando-se de água destilada.

3.4 Análise da qualidade do biogás

A qualidade do biogás foi avaliada a partir dos teores de metano (CH_4), gás carbônico (CO_2), amônia (NH_3) e gás sulfídrico (H_2S), utilizando-se que um kit de análise de biogás, da marca Alfakit, conforme metodologia apresentada por KUNZ et al. (2007).

Amostras foram coletadas entre períodos que variaram de 3 a 7 dias, durante todo o período experimental, e mantidas em sacos plásticos (bags) de 500 mL de volume, específicos para este fim.

3.5 Análise estatística

Os dados da produção e qualidade do biogás e características dos afluentes, efluentes, substratos e co-substratos, obtidos na realização do experimento, foram analisados e discutidos a partir do uso de estatística descritiva, a partir dos valores médios, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio e composição quantitativa dos tratamentos

O período de realização do experimento foi compreendido entre 30/6/17 a 11/01/18, sendo que os ensaios 1, 2 e 3 tiveram a duração de 43, 64 e 64 dias, respectivamente.

Para a composição quantitativa dos tratamentos, visando obter resultados de sólidos totais entre 7 e 9 % na mistura (conforme já detalhado na metodologia), foram estimados, com base na literatura, o teor de sólido total para o substrato e cada co-substrato. Também, levando-se em consideração a recomendação de utilização do volume de inóculo no biorreator de 20% e fazendo-se uso da quantidade de co-substrato como sendo 30% do sólido total adicionado (para os tratamentos com co-substrato - tratamentos 2 e 3) calculou-se a quantidade de matéria fresca utilizada para cada um dos tratamentos.

Na Tabela 3 são apresentados os teores médios de sólidos totais para o inóculo (I), esterco bovino (EB), palha de milho (PM) e palha de feijão (PF), determinados na realização de cada ensaio. Já quanto aos teores de sólidos voláteis (SV) para o inóculo (I), foram observados valores médios de 74,58; 52,37 e 73,36 % de ST, para os ensaios 1, 2 e 3 respectivamente.

TABELA 3. Teor médio de sólidos totais determinados para o inóculo (I), esterco bovino (EB), palha de milho (PM) e palha de feijão (PF), utilizados nos ensaios

Ensaio	Teor de sólidos totais (ST), em %			
	I	EB	PM	PF
01	5,50	13,41	90,81	88,54
02	1,58	13,73	90,81	88,54
03	1,71	13,23	90,81	88,54

Nas Tabelas 4, 5 e 6 são apresentadas a composição quantitativa dos tratamentos, com base em massa de matéria fresca e de matéria seca, e os resultados dos sólidos totais (ST), sólidos totais adicionados (STad), sólidos voláteis (SV) e sólidos voláteis adicionados (SV ad), além da quantidade de co-substrato utilizada nos tratamentos com adição de palha.

TABELA 4. Composição quantitativa dos tratamentos no ensaio 1

Tratamento 1 (I+EB+A)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	280	720	0	0	400
Matéria seca (g)	15,4	96,6	0	0	0
ST (%)			7,60		
STad (g)			91,00		
SVad (g)			80,36		
Tratamento 2 (I+EB+PM+A)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	280	503,6	34,43	0	582
Matéria seca (g)	15,4	67,5	31,3	0	0
ST (%)			7,96		
STad (g)			96,04		
SVad (g)			81,62		
Co-substrato (% STad)			32,59		
Tratamento 3 (I+EB+PF+A)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	280	503,6	0	37,9	579
Matéria seca (g)	15,4	67,5	0	33,6	0
ST (%)			8,30		
STad (g)			100,84		
SVad (g)			82,04		
Co-substrato (% STad)			33,32		
Controle (I)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	1400	0	0	0	0
Matéria seca (g)	77	0	0	0	0
ST (%)			5,5		
STad (g)			0,0		
SVad (g)			0,0		

I = inóculo; EB = esterco bovino; PM = palha de milho; PF = palha de feijão; A = água; ST = sólido total; STad = sólido total adicionado; SV = sólido volátil; SVad = sólido volátil adicionado.

TABELA 5. Composição quantitativa dos tratamentos no ensaio 2

Tratamento 1 (I+EB+A)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	277	720	0	0	480
Matéria seca (g)	4,38	98,95	0	0	
ST (%)			6,95		
STad (g)			98,27		
SVad (g)			78,64		
Tratamento 2 (I+EB+PM+A)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	272,73	503,6	34,43	0	596
Matéria seca (g)	4,31	69,1	31,3	0	0
ST (%)			7,25		
STad (g)			97,68		
SVad (g)			81,44		
Co-substrato (% STad)			32,04		
Tratamento 3 (I+EB+PF+A)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	281,97	503,6	0	37,9	635
Matéria seca (g)	4,46	69,1	0	33,6	0
ST (%)			7,49		
STad (g)			104,78		
SVad (g)			87,21		
Co-substrato (% STad)			32,06		
Controle (I)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	1412	0	0	0	0
Matéria seca (g)	22,31	0	0	0	0
ST (%)			1,6		
STad (g)			0,0		
SVad (g)			0,0		

I = inóculo; EB = esterco bovino; PM = palha de milho; PF = palha de feijão; A = água; ST = sólido total; STad = sólido total adicionado; SV = sólido volátil; SVad = sólido volátil adicionado.

TABELA 6. Composição quantitativa dos tratamentos no ensaio 3

Tratamento 1 (I+EB+A)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	280,17	720,76	0	0	400
Matéria seca (g)	4,79	95,36	0	0	0
ST (%)			7,18		
STad (g)			95,80		
SVad (g)			87,56		
Tratamento 2 (I+EB+PM+A)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	282,19	504	34,43	0	570
Matéria seca (g)	4,83	66,7	31,3	0	0
ST (%)			7,44		
STad (g)			98,64		
SVad (g)			85,89		
Co-substrato (% STad)			31,7		
Tratamento 3 (I+EB+PF+A)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	274,1	504	0	37,9	580
Matéria seca (g)	4,69	66,7	0	33,6	0
ST (%)			7,81		
STad (g)			104,34		
SVad (g)			91,78		
Co-substrato (% STad)			32,2		
Controle (I)					
Variáveis	I (g)	EB (g)	PM (g)	PF (g)	A (g)
Massa fresca utilizada (g)	1400	0	0	0	0
Matéria seca (g)	23,94	0	0	0	0
ST (%)			1,7		
STad (g)			0,0		
SVad (g)			0,0		

I = inóculo; EB = esterco bovino; PM = palha de milho; PF = palha de feijão; A = água; ST = sólido total; STad = sólido total adicionado; SV = sólido volátil; SVad = sólido volátil adicionado.

Os resultados apresentados demonstram que o teor de sólidos totais observado nos 3 ensaios para os 3 tratamentos, foram mantidos entre 6,95 e 8,3%, seguindo as recomendações de COMASTRI (1981).

XAVIER e LUCAS JUNIOR (2010) trabalhando com dejetos de vacas leiteiras e com biodigestores do tipo batelada, citam valores para os sólidos totais nos tratamentos que utilizaram entre 7,14 a 9,09%, considerando estes próximos daqueles recomendados para o tipo de dejetos e para o tipo de biodigestor. Também AMARAL et al. (2004) trabalhando com dejetos de bovinos leiteiros em diferentes modelos de biodigestores e tempos de retenção hidráulica, observaram teores de sólidos totais contidos no afluente entre 7,56 e 11,54% e sólidos volatéis entre 5,98 e 9,62%. De acordo com XAVIER e LUCAS JUNIOR (2010), os teores de sólidos totais dos dejetos

variam em função dos alimentos e da quantidade de água consumida pelos animais, e também a outros fatores ligados aos animais, sendo que, no momento do abastecimento de biodigestores, é importante considerar os valores de sólidos totais e sólidos voláteis, pois estes são os precursores do metano e dióxido de carbono e ácidos voláteis na biodigestão anaeróbia.

Os resultados apresentados para sólidos totais adicionados (STad) e sólidos voláteis adicionados (SVad) serviram de base para determinação das curvas de produção de biogás.

4.2 Caracterização dos materiais utilizados nos tratamentos

Nas Tabelas 7, 8 e 9 são apresentados os resultados das análises feitas para o substrato esterco bovino (EB) e os co-substratos palha de milho (PM) e palha de feijão (PF).

TABELA 7. Características do esterco bovino (EB) utilizado na composição dos tratamentos

Variáveis	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	CV (%)
Data	30/06/17	01/09/17	08/11/17	-----	-----
ST (%)	13,41	13,73	13,23	13,46	1,88
SF (% MF)	2,31	3,07	1,93	2,44	23,82
SF (% ST)	17,23	22,34	14,56	18,04	21,91
SV (% MF)	11,09	10,67	11,30	11,02	2,91
SV (% ST)	82,77	77,66	85,44	81,96	4,82
pH	6,1	6,5	5,7	6,1	6,5
CE (μ S/cm)	19.650	15.730	8.186	14.522	40,12
N (%)	2,32	2,07	2,00	2,13	7,9
P (g/kg)	2,96	2,32	1,17	2,15	42,19
K (g/kg)	12,06	24,31	6,70	14,36	62,87
C (%)	43,33	39,97	44,36	42,55	5,39
DQO (mg /L)	-----	92.619	88.123	90.371	3,52
Relação C/N	18,68	19,31	22,18	20,06	9,31
Umidade (%)	86,59	86,27	86,77	86,54	0,29

TABELA 8. Características das palhas de milho (PM) utilizadas na composição dos tratamentos

Variáveis	1ª Repetição	2ª Repetição	3ª Repetição	Média	CV (%)
Data	18/09/17	18/09/17	18/09/17	-----	-----
ST (%)	87,89	90,39	94,14	90,81	3,5
SF (% MF)	11,46	14,90	18,53	14,96	23,6
SF (% ST)	13,04	16,49	19,68	16,40	20,2
SV (% MF)	76,43	75,49	75,61	75,84	0,7
SV (% ST)	86,96	83,51	80,32	83,60	4
pH	6,4	6,4	6,3	6,4	0,2
CE (μ S/cm)	13.330	13.700	13.760	13.596	1,7
N (%)	1,71	1,79	1,80	1,77	2,8
P (mg/kg)	0,00	0,00	0,14	0,05	173,2
K (mg/kg)	10,99	11,23	10,53	10,92	3,3
C (%)	42,22	42,42	42,14	42,26	0,3
Relação C/N	24,69	23,70	23,41	23,93	2,8
Umidade (%)	12,11	9,61	5,86	9,19	34,2

TABELA 9. Características das palhas de feijão (PF) utilizadas na composição dos tratamentos

Variáveis	1ª Repetição	2ª Repetição	3ª Repetição	Média	CV (%)
Data	18/09/17	18/09/17	18/09/17	-----	-----
ST (%)	89,51	89,27	86,83	88,54	1,7
SF (% MF)	15,41	15,71	14,43	15,18	4,4
SF (% ST)	17,22	17,60	16,61	17,14	2,9
SV (% MF)	74,10	73,56	72,41	73,36	1,2
SV (% ST)	82,78	82,40	83,39	82,86	0,6
pH	5,7	5,7	5,6	5,7	0,1
CE (μ S/cm)	14.080	13.240	13.650	13.656	3,1
N (%)	1,20	1,21	1,28	1,23	3,5
P (mg/kg)	0,67	0,44	0,44	0,52	25,7
K (mg/kg)	12,41	12,17	12,64	12,41	1,9
C (%)	40,61	40,40	40,53	40,51	0,3
Relação C/N	33,84	33,39	31,66	32,96	3,5
Umidade (%)	10,49	10,73	13,17	11,46	12,9

ST = sólidos totais; SF = sólidos fixos; SV = sólidos voláteis; pH = potencial hidrogeniônico; CE = condutividade elétrica; N = nitrogênio total; P = fósforo total; K = potássio; C = carbono total; DQO = demanda química de oxigênio; CV = coeficiente de variação.

Para o esterco bovino, observaram-se pequenas variações para os parâmetros ST, SV, pH, N, C, DQO, relação C/N e umidade, entre os materiais utilizados como substrato nos 3 ensaios, sendo observados baixos valores do CV. Além do mais, as análises de ST, SV, pH, C, N e relação C/N são de fundamental importância para análise de substratos utilizados em digestão anaeróbia, demonstrando aqui excelente uniformidade destes materiais coletados em 3 momentos distintos. Já para os parâmetros CE, SF, P, K foram observados maiores coeficientes de variação, devido a fatores provavelmente relacionados à dieta dos animais. Mesmo assim, os resultados obtidos estão de acordo com citação de FRIEHE et al. (2010), em relação aos teores de fósforo e sólidos fixos. Em relação aos teores de P e K, XAVIER (2009) obteve em biodigestores semicontínuos, biofertilizante a partir de dejetos de vacas em lactação co-digeridos com cana-de-açúcar, com teores de P e K de 3,03% e 2,5%, respectivamente. Já MONTORO (2017) encontrou resultados de 1,88% e 2,1% para os teores de P e K, respectivamente, em biodigestores semicontínuos com batata doce co-digeridos com dejetos bovinos leiteiros na proporção 50:50.

Para as palhas de milho e feijão estudadas, os resultados encontrados apresentaram pequena variação, para a maioria dos parâmetros, com exceção para SF, umidade e para os teores de P, sendo que para este último parâmetro isso ocorreu devido seus valores serem bastante baixos e pelo método utilizado para a análise em laboratório.

Ao se compararem as palhas de milho e de feijão, chama a atenção os resultados de pH (sendo observada maior acidez para a palha de feijão), N (a palha de milho apresentou teores mais elevados) e relação C/N (maiores valores para a palha de feijão). Estes valores encontrados estão de acordo com os observados por OLIVEIRA et al (2017) que encontrou o valor pH de 5,52 na

palha de feijão utilizada como meio filtrante no tratamento da água residuária da suinocultura. Em relação ao pH observa-se que da palha de feijão está um pouco abaixo do recomendado para o funcionamento de biodigestores, sendo que DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008) cita como faixa ótima pH entre 6,7 e 7,5. Para a relação C/N, observa-se que a palha de milho apresentou menores resultados devido a mesma ter sido obtida da planta inteira de milho, diferente da palha da espiga que apresenta valores mais elevados da relação C/N.

4.3 Caracterização dos tratamentos e do controle

Nas Tabelas 10 a 13 são apresentados os resultados das análises dos afluentes e efluentes para os tratamentos e controle, para ambos os ensaios.

TABELA 10. Resultados médios das análises do afluente (Af) e efluente (Ef) dos três ensaios para o tratamento 1 (I+EB+A)

Variáveis	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Média		Variação Média
	Af	Ef	Af	Ef	Af	Ef	Af	Ef	
Data	30/6/17	12/8/17	1/9/17	4/11/17	8/11/17	11/1/18	-----	-----	-----
ST (%)	7,60	5,71	6,95	4,04	7,18	4,80	7,24	4,85	-33,0%
SF (% MF)	1,04	1,00	1,47	0,98	0,68	0,37	1,06	0,78	-26,3%
SF (% ST)	13,72	17,56	21,20	24,36	9,45	7,58	14,79	16,50	11,6%
SV (% MF)	6,56	4,71	5,48	3,06	6,50	4,43	6,18	4,07	-34,2%
SV (% ST)	86,28	82,44	78,80	75,64	90,55	92,42	85,21	83,50	-2,0%
pH	6,0	7,2	6,7	7,3	6,4	6,9	6,4	7,1	11,9%
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3.606	5.742	6.016	5.873	3.382	6.813	4.335	6.142	41,7%
N (%)	2,40	2,47	2,17	2,84	2,14	2,71	2,24	2,67	19,5%
P (g/kg)	1,90	2,45	1,53	3,76	0,90	1,15	1,44	2,45	70,0%
K (g/kg)	13,17	15,62	17,48	12,06	7,94	10,27	12,86	12,65	-1,7%
C (%)	42,27	40,20	39,91	36,19	44,25	41,37	42,14	39,25	-6,9%
DQO (mg /L)	----	----	37.793	18.415	72.359	85.501	55.076	51.958	-5,7%
Relação C/N	17,61	16,28	18,39	12,74	20,68	15,27	18,89	14,76	-21,9%

AF = afluente; EF = efluente; ST = sólidos totais; SF = sólidos fixos; SV = sólidos voláteis; MF = matéria fresca; pH = potencial hidrogeniônico; CE = condutividade elétrica; N = nitrogênio total; P = fósforo total; K = potássio; C = carbono total; DQO = demanda química de oxigênio.

TABELA 11. Resultados médios das análises do afluente (Af) e efluente (Ef) dos três ensaios para o tratamento 2 (I+EB+PM+A)

Variáveis	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Média		Variação Média
	Af	Ef	Af	Ef	Af	Ef	Af	Ef	
Data	30/6/17	12/8/17	1/09/17	4/11/17	8/11/17	11/1/18	-----	-----	-----
ST (%)	7,96	5,90	7,25	4,41	7,44	5,30	7,55	5,20	-31,1%
SF (% MF)	1,31	1,03	1,30	0,73	1,01	0,66	1,21	0,81	-33,1%
SF (% ST)	16,29	17,41	17,91	16,28	13,53	12,51	15,91	15,40	-3,2%
SV (% MF)	6,65	4,87	5,95	3,68	6,43	4,63	6,34	4,39	-30,7%
SV (% ST)	83,71	82,59	82,09	83,72	86,47	87,49	84,09	84,60	0,6%
pH	6,1	7,2	6,7	7,2	6,4	6,9	6,4	7,1	11,3%
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4.399	6.411	5.844	6.059	3.632	7.313	4.625	6.594	42,6%
N (%)	2,14	2,46	1,95	2,56	2,02	2,59	2,04	2,54	24,5%
P (g/kg)	2,04	3,80	1,20	3,41	0,29	0,54	1,18	2,58	119,5%
K (g/kg)	14,95	17,62	8,88	15,62	7,94	10,76	10,59	14,67	38,5%
C (%)	41,90	40,68	41,39	38,59	43,98	41,79	42,42	40,35	-4,9%
DQO (mg /L)	----	----	36.234	7.983	39.306	89.719	37.770	48.851	29,3%
Relação C/N	19,58	16,54	21,23	15,07	21,77	16,14	20,86	15,92	-23,7%

AF = afluente; EF = efluente; ST = sólidos totais; SF = sólidos fixos; SV = sólidos voláteis; MF = matéria fresca; pH = potencial hidrogeniônico; CE = condutividade elétrica; N = nitrogênio total; P = fósforo total; K = potássio; C = carbono total; DQO = demanda química de oxigênio.

TABELA 12. Resultados médios das análises do afluente (Af) e efluente (Ef) dos três ensaios para o tratamento 3 (I+EB+PF+A)

Variáveis	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Média		Variação Média
	Af	Ef	Af	Ef	Af	Ef	Af	Ef	
Data	30/6/17	12/8/17	1/9/17	4/11/17	8/11/17	11/1/18	-----	-----	-----
ST (%)	8,30	6,99	7,49	5,33	7,81	6,83	7,87	6,38	-18,9%
SF (% MF)	1,62	1,10	1,35	0,97	0,99	0,73	1,32	0,93	-29,3%
SF (% ST)	19,54	15,73	18,01	18,13	12,67	10,63	16,74	14,83	-11,4%
SV (% MF)	6,68	5,89	6,14	4,37	6,82	6,11	6,55	5,46	-16,6%
SV (% ST)	80,46	84,27	81,99	81,87	87,33	89,37	83,26	85,17	2,3%
pH	5,8	4,9	6,5	4,7	6,5	4,7	6,3	4,8	-23,8%
CE (μ S/cm)	3.867	5.153	5.804	6.043	3.549	8.456	4.407	6.551	48,6%
N (%)	2,15	2,20	1,89	2,35	1,94	2,03	1,99	2,19	10,0%
P (g/kg)	2,31	2,69	0,70	1,63	0,27	0,97	1,09	1,76	61,3%
K (g/kg)	13,40	14,73	7,47	12,50	7,00	6,53	9,29	11,25	21,1%
C (%)	42,53	42,19	40,53	41,68	43,25	42,07	42,10	41,98	-0,3%
DQO (mg /L)	----	----	38.986	62.528	57.176	92.990	48.081	77.759	61,7%
Relação C/N	19,78	19,18	21,44	17,74	22,29	20,72	21,17	19,21	-9,3%

AF = afluente; EF = efluente; ST = sólidos totais; SF = sólidos fixos; SV = sólidos voláteis; MF = matéria fresca; pH = potencial hidrogeniônico; CE = condutividade elétrica; N = nitrogênio total; P = fósforo total; K = potássio; C = carbono total; DQO = demanda química de oxigênio.

TABELA 13. Resultados médios das análises do afluente (Af) e efluente (Ef) dos três ensaios para o controle (I)

Variáveis	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Média		Variação Média
	Af	Ef	Af	Ef	Af	Ef	Af	Ef	
Data	30/6/17	12/8/17	01/9/17	4/11/17	8/11/17	11/1/18	-----	-----	-----
ST (%)	5,50	4,90	1,58	1,21	1,71	1,16	2,93	2,42	-17,3%
SF (% MF)	1,40	1,35	0,75	0,50	0,45	0,30	0,87	0,72	-17,3%
SF (% ST)	25,42	27,50	47,63	40,98	24,64	23,82	32,56	30,77	-5,5%
SV (% MF)	4,10	3,55	0,83	0,71	1,25	0,86	2,06	1,71	-17,2%
SV (% ST)	74,58	72,50	52,37	59,02	73,36	76,18	66,77	69,23	3,7%
pH	6,9	7,2	7,3	7,3	7,5	7,2	7,3	7,29	-0,1%
CE (μ S/cm)	5.438	6.707	6.798	5.050	6.196	11.353	6.144	7.703	25,4%
N (%)	2,28	2,42	2,95	2,98	2,79	3,01	2,67	2,80	4,9%
P (g/kg)	3,22	2,69	1,60	3,05	0,77	1,73	1,86	2,49	33,6%
K (g/kg)	20,51	18,29	29,34	30,51	22,29	28,87	24,05	25,89	7,7%
C (%)	35,78	36,33	28,02	24,87	35,11	29,30	32,97	30,17	-8,5%
DQO (mg /L)	----	----	19.123	28.572	8.101	18.979	13.612	23.776	74,7%
Relação C/N	15,69	15,01	9,50	8,35	12,58	9,73	12,59	11,03	-12,4%

AF = afluente; EF = efluente; ST = sólidos totais; SF = sólidos fixos; SV = sólidos voláteis; MF = matéria fresca; pH = potencial hidrogeniônico; CE = condutividade elétrica; N = nitrogênio total; P = fósforo total; K = potássio; C = carbono total; DQO = demanda química de oxigênio.

Após o processo de biodigestão em todos os tratamentos houve redução no teor de sólidos totais e também de sólidos voláteis, mostrando a eficiência do processo em produzir biogás, com redução superior a 30% de ambos os parâmetros para os tratamentos 1 e 2. Para o tratamento 3 a redução de ST e SV foi menor, visto que foi observada uma inibição no processo de biodigestão já nos primeiros dias de cada ensaio, em virtude talvez de um desequilíbrio do pH no biorreator (um maior detalhamento sobre a inibição da produção de biogás no Tratamento 3 será discutida e apresentada mais adiante). Já para o controle o teor de sólidos totais foi sempre menor, pois este material já vem de processos de biodigestão em funcionamento, o que reduz seus teores de sólidos totais. De acordo com ORRICO et al. (2016), no processo de digestão anaeróbia, as reduções dos teores de sólidos totais e sólidos voláteis estão diretamente relacionadas com o uso dos compostos orgânicos pelos microrganismos na degradação da matéria orgânica, para a produção de biogás. Ainda segundo este mesmo autor, que avaliou a co-digestão dos dejetos de bovinos leiteiros e óleo de descarte, foram observadas reduções nos teores de sólidos totais e sólidos voláteis de 47,53 e 51,28%, respectivamente, sendo estes valores superiores ao do presente trabalho, provavelmente em virtude da adição do óleo como fonte protéica.

Já no trabalho de AMARAL et al. (2004) com dejetos de bovinos leiteiros em diferentes modelos de biodigestores e tempos de retenção hidráulica, foram observadas reduções nos teores de sólidos totais entre 24,21 e 36,61% e sólidos voláteis entre 26,08 e 40,36%, semelhantes ao do presente trabalho. Também CUETOS et al. (2011) observaram reduções no teor de sólidos totais entre 39,0 e 60,5% no seu trabalho de co-digestão anaeróbia de esterco suíno com resíduos de culturas energéticas, e reduções no teor de sólidos voláteis entre 36,6 e 52,3%.

XAVIER e LUCAS JUNIOR (2010), que realizaram estudo com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo, obtiveram reduções nos teores de sólidos voláteis que variaram de 32,29 a 50,72% no período intermediário; 35,27 a 47,15% no período chuvoso e 22,41 a 42,49% no período seco. Também XAVIER et al. (2016) avaliando a digestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros alimentados com diferentes volumosos, em que alguns dejetos receberam caldo de cana-de-açúcar como aditivo, foram observadas reduções nos teores de sólidos voláteis nos biodigestores batelada e semi-contínuos de 51% em todos os substratos.

Em relação ao pH, os resultados esperados em condições normais da digestão anaeróbia são de neutralização do mesmo devido ao efeito tampão do carbonato e da amônia (FRIEHE et al. 2010), o que foi prontamente observado para os tratamentos 1 e 2. De acordo com os trabalhos de CREMONEZ et al. (2014), SAGULA (2012) e ORRICO JUNIOR et al. (2016), em estudos sobre digestão anaeróbia os resultados de pH sempre tenderam a estabilização. Em outras palavras, tanto o tratamento 1 (I+EB+A) como o tratamento 2 (I+EB+PM+A) tiveram o biorreator funcionamento dentro do esperado, ou seja, dentro da normalidade. Já em relação ao tratamento 3 (I+EB+PF+A),

onde foi constatada a inibição do sistema quanto a produção de biogás, observou-se uma redução do pH do efluente (Ef) em relação ao afluente (AF), não permitindo o seu funcionamento normal. Segundo FRIEHE et al. (2010), o valor de pH se reduz quando a capacidade de tamponamento do sistema se esgota, ou seja, quando ocorre um acúmulo muito grande de ácidos orgânicos, podendo ocasionar a inibição do biodigestor. Os resultados para o controle mostraram que não houve variação do pH, pois o material de entrada já encontrava-se estabilizado, o qual foi constituído apenas de inóculo.

XAVIER et al. (2016) encontrou valores de pH entre 6,04 e 6,9 para os substratos utilizados para alimentação diária dos biodigestores semicontínuos, e valores de pH entre 7,45 a 7,51 para os efluentes.

Também para ORRICO et al. (2016), avaliando a co-digestão dos dejetos de bovinos leiteiros e óleo de descarte, os valores de pH dos afluentes e efluentes permaneceram próximos de 7, sendo que o mesmo foi aumentado à medida que o nível de inclusão de óleo foi maior. Já no trabalho de LI et al. (2013) foram observados valores de pH no final do processo de biodigestão entre 7,4 e 7,5, ao avaliar a produção de metano a partir de digestão anaeróbia e da co-digestão de resíduos de cozinha, palha de milho e esterco de frango, corroborando com os resultados do presente trabalho.

Em relação aos teores de nitrogênio total, observou-se aumentos médios mais expressivos nos tratamentos 1 e 2, de 19,5 e 24,5% respectivamente. Pode-se observar que com a adição da palha na mistura para composição do tratamento 2, o teor inicial de N para o tratamento com palha de milho foi menor que para o tratamento sem palha (tratamento 1), porém o incremento final acabou sendo maior no efluente do tratamento 2. Já para o tratamento 3 o aumento foi menor, devido a parada do biorreator. O controle foi o que apresentou menor aumento, pois foi composto apenas de inóculo.

Para os teores de C, o esperado é a redução dos seus teores visto que partes deste é utilizado na formação do metano, principal componente do biogás. Neste sentido, foi observado redução na concentração de C para os tratamentos 1 e 2, e também para o controle. Porém para o tratamento 3 praticamente não foi observada variação, confirmando a observação de que o biorreator houve inibição do processo anaeróbio devido a adição da palha de feijão.

Já para a relação C/N, a redução nos teores de C e aumento dos teores de N provocados pelo processo de digestão anaeróbia provocaram o efeito da redução da relação C/N, sendo observadas maiores reduções para os tratamentos 1 e 2. De acordo com ZANATTA (2011), que determinou a relação C/N e foram obtidos resultados entre 10 e 15 nas misturas, contendo cama de aviário e combinações entre a cama de aviário, palha de trigo, esterco de galinhas e silagem de centeio.

Os teores de fósforo e potássio apresentaram valores próximos aos trabalhos de FRIEHE et al. (2010), onde houve aumento dos teores médios destes macronutrientes após o processo de biodigestão, com exceção para o potássio do tratamento 1, que apresentou ligeira redução no teor de potássio.

Em relação à condutividade elétrica (CE) e a DQO, devido ao comportamento heterogêneo dos resultados, não foi possível identificar um comportamento uniforme destes parâmetros, estudados nos tratamentos.

4.4 Volume de biogás produzido

Nas Tabelas 14 e 15 são apresentados os resultados da produção de biogás, em diferentes unidades, para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente, para os tratamentos 1 (I+EB+A) e 2 (I+EB+PM+A). Os resultados para o tratamento 3 (I+EB+PF+A) não foram apresentados devido a inibição do processo de produção de biogás ocorrido nos três ensaios realizados.

TABELA 14. Resultados da produção total de biogás para o tratamento 1 (I+EB+A), nos três ensaios

Variáveis	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	CV (%)
PB (Nm ³)	0,0262	0,0298	0,0276	0,0279	6,7%
PB (Nm ³ /kg STad)	0,2876	0,3038	0,2882	0,2932	3,1%
PB (Nm ³ /kg MFad)	0,0364	0,0415	0,0383	0,0387	6,7%
PB (Nm ³ /kg SVad)	0,3257	0,3796	0,3153	0,3402	10,1%

PB (Nm³): produção de biogás, normal metro cúbico; ST ad = sólidos totais adicionados; MF ad = matéria fresca adicionada; SV ad = sólidos voláteis adicionados; CV (%) = coeficiente de variação.

TABELA 15. Resultados da produção total de biogás para o tratamento 2 (I+EB+PM+A), nos três ensaios

Variáveis	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	CV (%)
PB (Nm ³)	0,0279	0,0270	0,0232	0,0260	9,7%
PB (Nm ³ /kg STad)	0,2905	0,2774	0,2349	0,2676	10,9%
PB (Nm ³ /kg MFad)	0,0500	0,0500	0,0400	0,0466	9,8%
PB (Nm ³ /kg SVad)	0,3418	0,3327	0,2697	0,3147	12,5%

PB (Nm³): produção de biogás, normal metro cúbico; ST ad = sólidos totais adicionados; MF ad = matéria fresca adicionada; SV ad = sólidos voláteis adicionados; CV (%) = coeficiente de variação.

A produção de biogás está diretamente associada à degradação do material orgânico pelos microrganismos anaeróbios, sendo que de acordo com AMARAL et al. (2004), o melhor fator a ser utilizado para refletir o potencial de determinada biomassa é aquele que expressa a produção

de biogás por kg de sólidos totais adicionados, por eliminar a interferência do teor de água presente na biomassa.

Neste sentido, observou-se que a produção de biogás para o tratamento 1 e 2 apresentaram resultados muito próximos, com coeficiente de variação inferior a 11%, tendo o tratamento 2, com palha de milho, um resultado ligeiramente inferior ao tratamento 1. Entretanto, indica a possibilidade de utilização de palha de milho como uma parcela dos sólidos totais adicionados nos biorreatores.

Como as quantidades de sólidos totais e voláteis adicionados foram semelhantes para todos os tratamentos, os resultados de produção de biogás por sólidos totais adicionados e sólidos voláteis adicionados apresentaram semelhante comportamento de produção de biogás, onde o tratamento 1 apresentou resultados pouco superiores ao tratamento 2.

No Brasil, para efeito de cálculos em projetos de biodigestão anaeróbia para dejetos de bovinos leiteiros, utilizam-se os potenciais obtidos por LUCAS JÚNIOR (1984), de 0,041 m³ de biogás por kg de dejetos, sendo estes valores semelhantes ao do presente trabalho que foi de 0,040 Nm³/kg MFad para o tratamento com esterco bovino (tratamento 1). Estes dados também estão de acordo com COMASTRI (1981), que cita valores de produção de biogás para esterco bovino fresco de 0,040 Nm³/kg MF.

Comparativamente a outros estudos, XAVIER (2009) ao estudar a produção de biogás de dejetos de bovinos leiteiros, sem adição de caldo de cana, encontrou resultado de 0,285 Nm³/kg STad, bastante semelhante ao presente estudo que obteve para o tratamento com esterco bovino (tratamento 1) e o com palha de milho (tratamento 2) valores de produção de biogás de 0,29 e 0,27 Nm³/kg STad, respectivamente. Já ZANATO (2014) encontrou valor para produção de biogás para dejetos de bovinos leiteiros de 0,24 Nm³/kg STad e AMARAL et al. (2004), ao estudar dejetos de bovinos encontrou valores bastante inferiores, na faixa de 0,10 a 0,12 Nm³/kg STad. Em trabalho de ORRICO et al. (2016), onde avaliou-se a co-digestão dos dejetos de bovinos leiteiros e óleo de descarte, observou-se produção de 0,20 L/g STad e 0,25 L/g SVad, para as doses de inclusão de 4,4 e 4,63% de óleo de descarte.

CUETOS et al. (2011) observaram uma produção específica de biogás entre 0,39 e 0,51 m³/kg SVad no seu trabalho de co-digestão anaeróbica de esterco suíno com resíduos de culturas energéticas, sendo valores superiores aos encontrados neste trabalho. Já em estudo realizado por LI et al. (2013), observou-se uma produção específica de biogás entre 417 e 1142 mL/g SVad avaliando a produção de metano a partir de digestão anaeróbia e co-digestão de resíduos de cozinha, palha de milho e estrume de frango. Também de acordo com XAVIER e LUCAS JUNIOR (2010), trabalhando com dejetos de bovinos leiteiros com e sem uso de inóculo,

observou-se potenciais médios de produção de biogás de 0,026 m³/kg substrato, 0,341 m³/kg STad e 0,416 m³/kg SVad.

4.4.1 Curvas de produção acumulada de biogás

Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas a produção acumulada de biogás, em Nm³/kg STad e Nm³/kg SVad, para os ensaios 1, 2 e 3 e o tratamento 1 (I+EB+A) e tratamento 2 (I+EB+PM+A). Estes parâmetros foram escolhidos para refletir o volume de produção de biogás final, conforme também citam os autores XAVIER (2009) e ZANNATA (2011). Já quanto ao tratamento 3 (I+EB+PF+A) em virtude da inibição da produção de biogás, não houve a quantificação do biogás produzido.

Observa-se um comportamento semelhante de produção de biogás para cada tratamento, nos três ensaios, evidenciando uma relativa uniformidade na condução do experimento. Observa-se que os tratamentos 1 (I+EB+A) e 2 (I+EB+PM+A) apresentaram volume de produção acumulada de biogás semelhantes. Em relação ao tratamento 1 (I+EB+A), nos primeiros dias a produção observada foi baixa, sendo que neste período de 1 a 10 dias a produção passa para um estágio crescente, nos três ensaios, até chegar a estabilização, não sendo observados picos de produção de biogás ou queda durante o tempo de realização dos 3 ensaios.

Já para o tratamento 2 (I+EB+PM+A), o mesmo apresentou um estágio inicial de baixa produção de biogás, que variou de 5 a 28 dias, período este maior que o observado para o tratamento 1. Posteriormente, a produção de biogás foi aumentando, passando por um estágio crescente até a estabilização do processo de produção no final de cada ensaio. Também neste mesmo tratamento por volta do vigésimo quinto dia do ensaio 2 observa-se uma oscilação na produção de biogás, sendo que isto pode ter ocorrido em função da necessidade de abertura do sistema, pois havia sido observado um entupimento na saída do biogás do biorreator, sendo feita a sua desobstrução.

Em estudo de LI et al. (2013), avaliando a produção de metano a partir de digestão e também da co-digestão anaeróbia de resíduos de cozinha, palha de milho e esterco de frango, a produção acumulada de biogás por kg de SV adicionado, foi iniciada imediatamente após ser inoculada, e continuou crescente até a estabilização.

Também YE et al. (2013) na avaliação da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de esterco suíno e da co-digestão de esterco suíno com palha de arroz, observaram o mesmo comportamento que o encontrado por LI et al (2013), ou seja, a produção acumulada de biogás por kg de SV adicionado foi iniciada imediatamente após ser inoculada, e continuou crescente até a estabilização. Já quando Ye et al. (2013) avaliou a digestão anaeróbia de palha de arroz, foi observado comportamento semelhante ao obtido neste estudo, ou seja, a produção acumulada de

biogás por kg de SV adicionado manteve-se baixa até por volta dos 10 dias iniciais, quando então passou para uma fase crescente até atingir a estabilização.

Ainda XAVIER e LUCAS JUNIOR (2010) observaram em seu trabalho referente a produção de biogás em biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras, com diferentes adições de inóculo, que a antecipação dos picos de produção de biogás de todos os tratamentos contendo inóculo pode ser observada em relação àqueles sem adição de inóculo.

CUETOS et al (2011) em seu trabalho de co-digestão anaeróbia de esterco suíno com resíduos de culturas energéticas, dentre estas o milho, a colza e o girassol, observou-se que do 1 aos 30 dias houve uma limitação na produção de biogás, mas após os 30 dias resultou em um gradual incremento na produção de biogás dos reatores avaliados, operados para o sistema semi-contínuo, em virtude do período de adaptação dos microorganismos ao substrato e co-substrato.

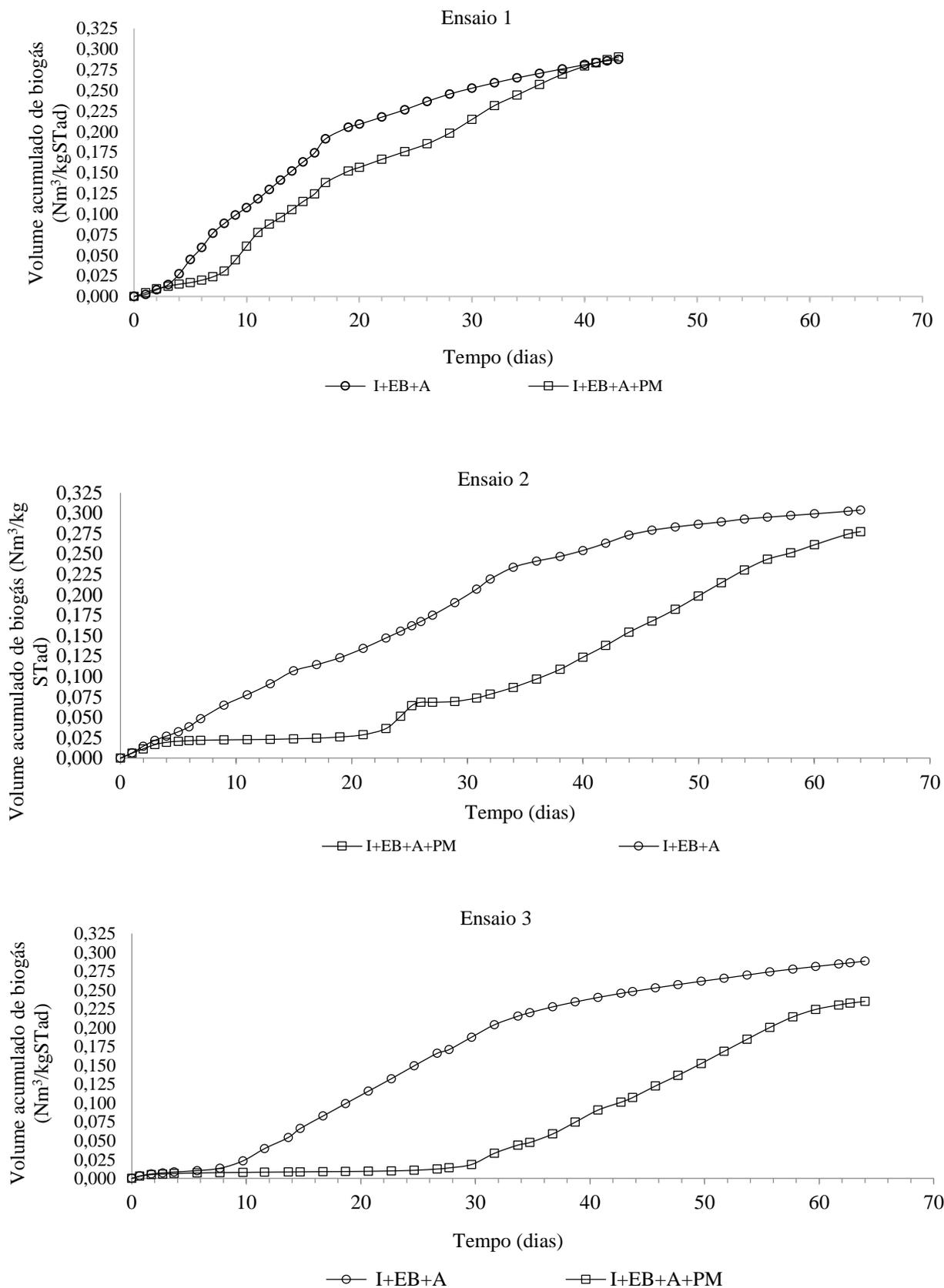


FIGURA 05. Produção acumulada de biogás (Nm³/kg STad) nos ensaios 1, 2 e 3 para o tratamento 1 (I+EB+A) e tratamento 2 (I+EB+PM+A).

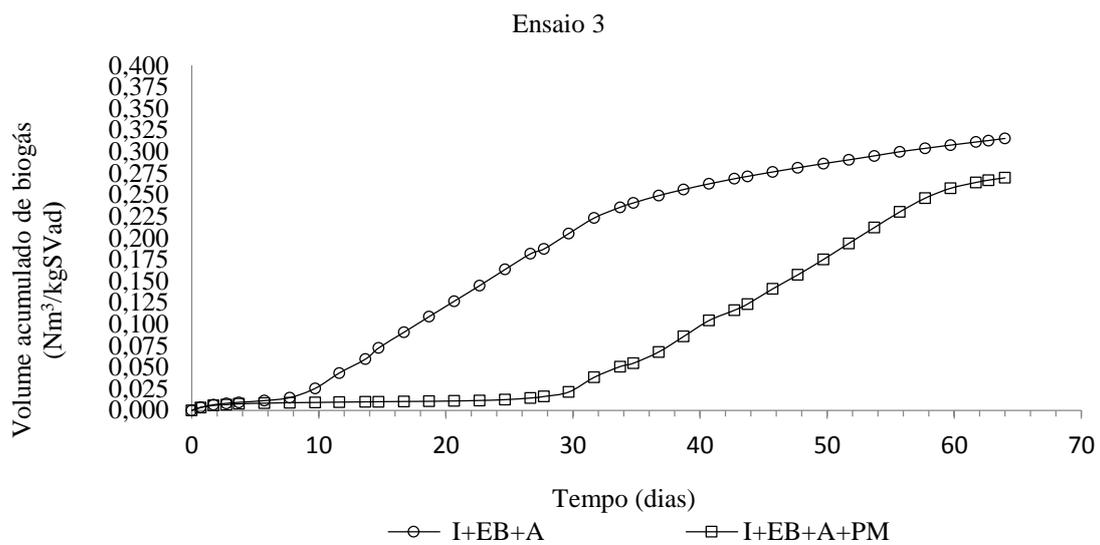
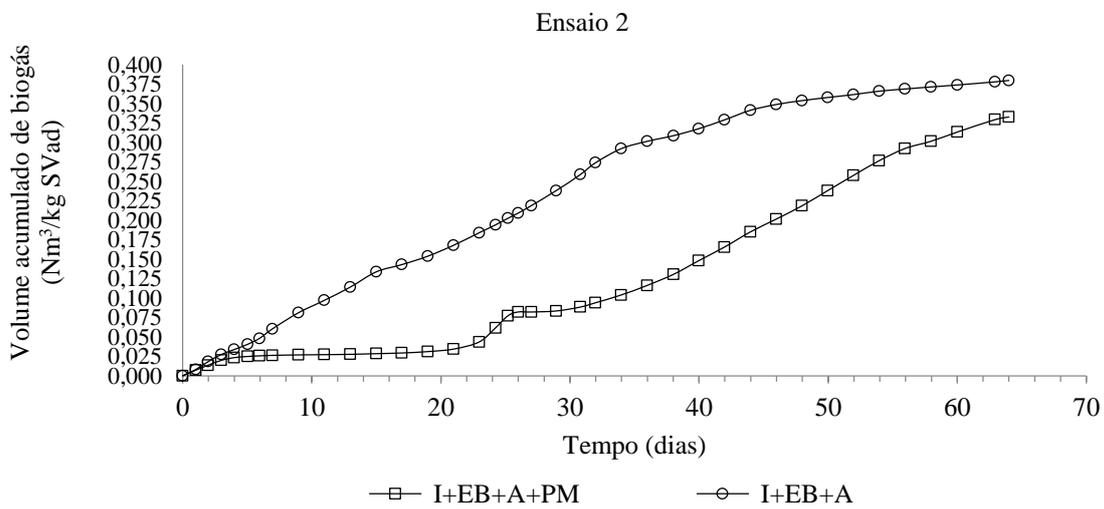
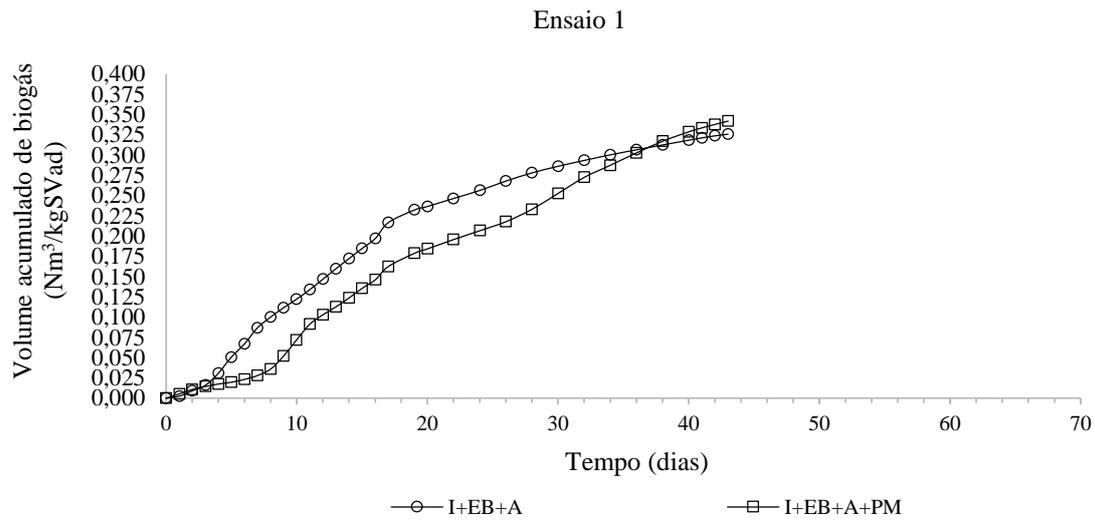


FIGURA 6. Produção acumulada de biogás (Nm³/kg SVad) nos ensaios 1, 2 e 3 para o tratamento 1 (I+EB+A) e tratamento 2 (I+EB+PM+A).

4.5 Qualidade do biogás produzido

Na Figura 7 são apresentadas as concentrações de metano (CH₄) medidas ao longo do tempo, em cada ensaio, para o tratamento 1 (I+EB+A), tratamento 2 (I+EB+PM+A) e controle (I). Já para o tratamento 3 (I+EB+PF+A), em virtude da inibição da produção de biogás, não houve a produção de resultados passíveis de serem comparados com os demais tratamentos.

Em relação ao controle, constituído por um biorreator apenas com inóculo, observa-se que este apresentou elevados teores de metano, em torno de 90%, principalmente nos ensaios 2 e 3, por ser um material em estágio de degradação avançado e estável, conforme citado por LUCAS JUNIOR (1994) e ORRICO JUNIOR et al. (2010). Já no ensaio 1 os teores de metano foram inferiores a 90%, pelo fato deste inóculo conter um teor de sólidos totais mais elevados que os demais. Já quanto aos tratamentos 1 (I+EB+A) e 2 (I+EB+PM+A) observa-se um comportamento bastante semelhante entre estes dois tratamentos, ao longo do tempo para ambos os 3 ensaios. Este comportamento indicou que no final do processo os teores de metano variaram entre 60 e 80%.

Estes dados estão de acordo com CUETOS et al. (2011) que observaram teores de metano entre 63,1 e 71,5% no seu trabalho de co-digestão anaeróbia de esterco suíno com resíduos de culturas energéticas. De acordo com FRIEHE et al. (2010), a faixa ideal para a composição do biogás em teores de metano varia entre 50 e 75% do volume.

Já para LI et al. (2013), foi observado teores de metano entre 51 e 60%, avaliando a produção de metano a partir de digestão e co-digestão anaeróbica de resíduos de cozinha, palha de milho e estrume de frango, corroborando com os resultados do presente trabalho. Neste estudo também observou-se que o conteúdo de metano do biogás aumentou de uma média de 27% para um nível relativamente constante de aproximadamente 58%, após cerca de 11 dias de experimento.

Também YE et al. (2013) observaram que nos dois primeiros dias o teor de metano foi de 30% e que até o décimo quarto dia houve um incremento no teor médio em torno de 50%, no final do experimento foi verificado um teor médio entre 50 e 60% nos tratamentos analisados.

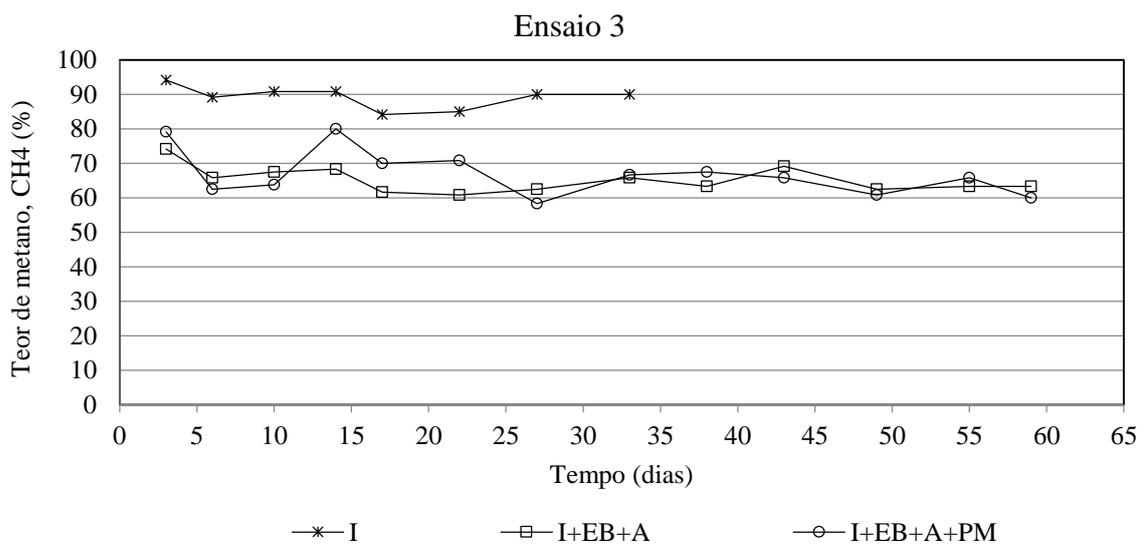
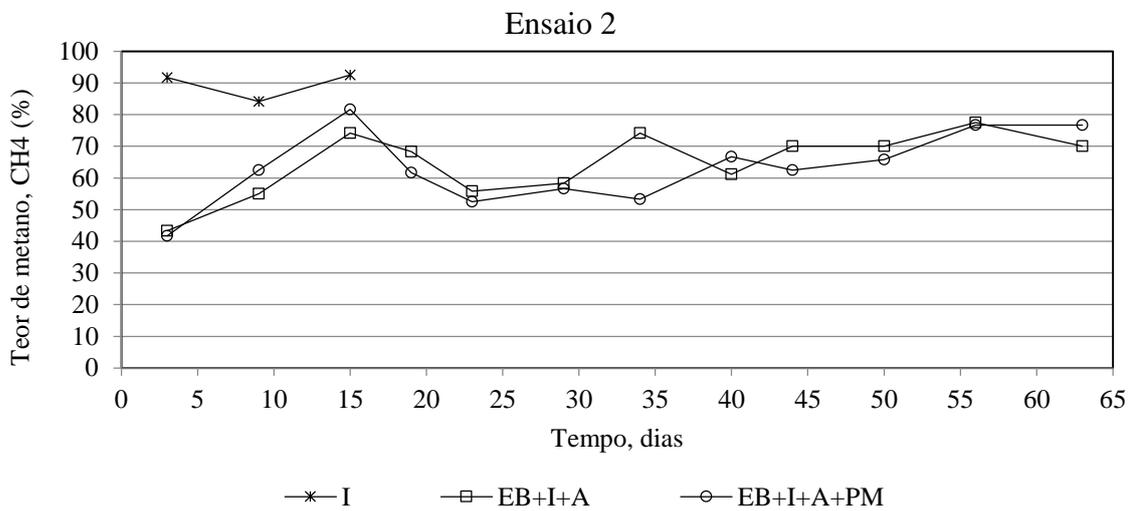
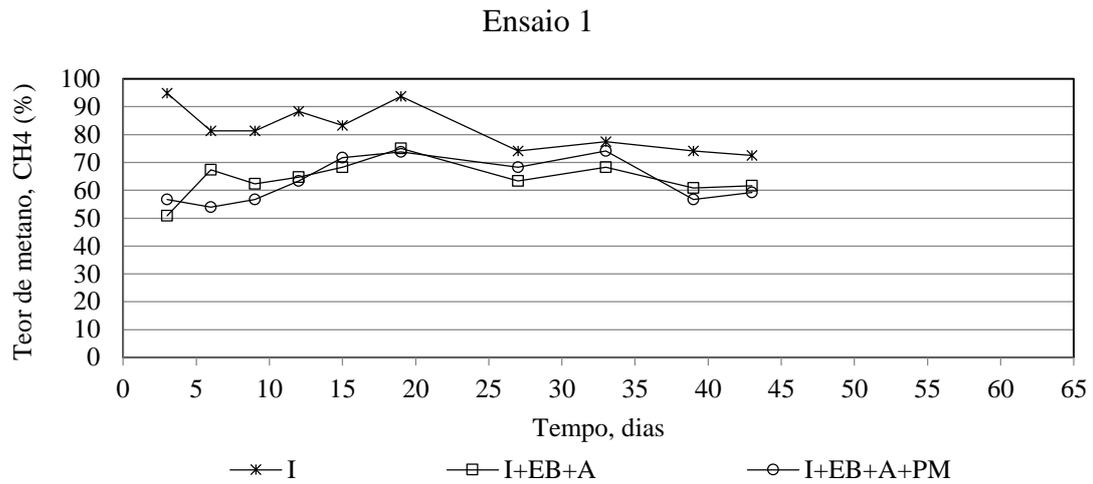


FIGURA 7. Teores de metano (CH₄) para o tratamento 1 (I+EB+A), tratamento 2 (I+EB+PM+A) e controle (I).

Os resultados da qualidade do biogás para a presença de amônia (NH₃) e ácido sulfídrico (H₂S) são apresentados nas Tabelas 16, 17 e 18. Para o tratamento 1 (I+EB+A), tratamento 2 (I+EB+PM+A) e controle (I). Quanto ao tratamento 3 (I+EB+PF+A), por causa da inibição da produção de biogás, não houve quantidade suficiente de amostras para fazer a análise da qualidade em relação aos teores de amônia e ácido sulfídrico.

Pode-se observar que relativo ao ácido sulfídrico, foi detectado somente traços de 20 (ppm) do mesmo em todos os ensaios. Quanto a presença de amônia, esta foi detectada em até 350 (ppm) no tratamento 2 para o ensaio 1, sendo que nos demais ensaios os resultados ficaram abaixo deste patamar. A presença destes elementos evidencia a necessidade de se purificar o biogás caso o mesmo seja aproveitado para a queima ou combustão em algum equipamento que possa ter componentes corrosivos, conforme citado em FRIEHE et al. (2010). Por fim, estes resultados obtidos não permitiram formular uma correlação a ponto de expressar um comportamento ao longo do tempo.

TABELA 16. Resultados médios do ensaio 1, para análise de teores de amônia (NH₃) e ácido sulfídrico (H₂S) em ppm

Tratamento 1 (I+EB+A)				
Data	10/07/17	20/07/17	03/08/17	Média
NH ₃ (ppm)	0,00	175,00	15,00	63,33
H ₂ S (ppm)	20,00	20,00	20,00	20,00
Tratamento 2 (I+EB+PM+A)				
NH ₃ (ppm)	0,00	350,00	136,66	162,22
H ₂ S (ppm)	20,00	20,00	20,00	20,00
Controle (I)				
NH ₃ (ppm)	15,00	45,00	15,00	25,00
H ₂ S (ppm)	20,00	20,00	20,00	20,00

TABELA 17. Resultados médios do ensaio 2, para análise de teores de amônia (NH₃) e ácido sulfídrico (H₂S), em ppm

Tratamento 1 (I+EB+A)						
Data	12/09/17	02/10/17	12/10/17	23/10/17	03/11/17	Média
NH ₃ (ppm)	25,00	15,00	15,00	15,00	58,33	25,67
H ₂ S (ppm)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Tratamento 2 (I+EB+PM+A)						
NH ₃ (ppm)	0,00	15,00	71,67	101,67	145,00	66,67
H ₂ S (ppm)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Controle (I)						
NH ₃ (ppm)	0,00	0,00	---	---	---	0,00
H ₂ S (ppm)	20,00	20,00	---	---	---	20,00

TABELA 18. Resultados do ensaio 3, para análise de teores de amônia (NH₃) e ácido sulfídrico (H₂S), em ppm

Tratamento 1 (I+EB+A)						
Data	20/11/17	03/12/17	17/12/17	30/12/17	09/01/18	Média
NH ₃ (ppm)	291,67	175,00	78,33	131,67	48,33	145,00
H ₂ S (ppm)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Tratamento 2 (I+EB+PM+A)						
NH ₃ (ppm)	0,00	45,00	0,00	15,00	15,00	15,00
H ₂ S (ppm)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Controle (I)						
NH ₃ (ppm)	0,00	15,00	---	---	---	7,50
H ₂ S (ppm)	20,00	20,00	---	---	---	20,00

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos com a realização deste estudo, é possível concluir que:

- o co-substrato palha de milho adicionado ao biorreator apresentou potencial de produção e qualidade de biogás semelhante ao biorreator contendo apenas o substrato esterco bovino leiteiro (sem adição de co-substrato), em condições mesofílicas;

- nas condições experimentais estudadas, o co-substrato palha de feijão não apresentou potencial de produção de biogás, possivelmente dada a condição de pH da palha observada (abaixo do recomendado para sistemas de biodigestão) e a concentração de palha adicionada ao biorreator;

Por fim, com base neste trabalho e nas condições avaliadas, a adição de palha de milho ao esterco bovino leiteiro proporcionou um desempenho semelhante ao esterco bovino leiteiro sem adição de palha, quanto à produção de biogás e também sua qualidade, o que indica ser a palha de milho um co-substrato que os produtores poderão utilizar em suas propriedades para abastecer seus biodigestores.

Entretanto, em relação a utilização da palha de feijão como co-substrato, recomenda-se a realização de novos estudos a fim de serem testadas menores concentrações de palha adicionada ao esterco bovino leiteiro, a ponto de não afetar de modo significativo a alteração no pH no biorreator e o seu funcionamento, não promovendo a sua inibição.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVAREZ, J. A.; OTERO, L.; LEMA, J. M. A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. **Bioresource Technology**, Santiago de Compostela, n.101 p. 1153–1158, 2010.
- AMARAL, C. M. C.; AMARAL, L. A.; LUCAS JUNIOR, J.; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRA, D. S; MACHADO, M. R. F. Digestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, 2004.
- APHA; AWWA; WEF. **American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. Standard Methods a for the examination of water and wastewater**. 22 ed., Washington, D.C, USA. 2012.
- ARRUDA, V. C. M. **Tratamento anaeróbio de efluentes gerados em matadouros de bovinos**. Recife - PE. Universidade Federal de Pernambuco, 2004, 127 f. Dissertação Mestrado.
- ASHEKUZZAMAN, S. M.; POULSEN, T. G. Optimizing feed composition for improved methane yield during anaerobic digestion of cow manure based waste mixtures. **Bioresource Technology**, Denmark n 102, p. 2213–2218, 2011.
- CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás**. Botucatu – SP. Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, 1985. 75 f. Dissertação Mestrado.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG), 2016. 379p.
- COMASTRI, J. A. F. **Biogás. Independência energética do Pantanal Mato-Grossense**. Circular Técnica nº 9. Outubro, 1981. EMBRAPA. Unidade de Execução de Pesquisa de Âmbito Estadual de Corumbá. Corumbá – Mato Grosso do Sul. <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/37692/1/CT09.pdf>> Acesso em 11/08/2017
- COSTA, L. V. C. **Biodigestão anaeróbia da cama de frango associada ou não ao biofertilizante obtido com dejetos de suínos: produção de biogás e qualidade do biofertilizante**. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 2009, 89 f. Jaboticabal, Dissertação Mestrado.
- CREMONEZ, P.A.; ROSSI, E.; FEROLDI, M.; TELEKEN, J.G. Codigestão de água residual de suinocultura e vinhaça sob diferentes condições térmicas. **Revista de Ciências Agrárias**, 38, p. 103-110, 2014.
- CUETOS, M. J.; FERNANDEZ, C.; GÓMEZ, X.; MORAN, A. Anaerobic Co-digestion of Swine Manure with Energy Crop Residues. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, n.16 p.1044-1052, 2011
- CUNHA, F. L. M. **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: um panorama tecnológico atual**. São Paulo – SP. Instituto Tecnológico do Estado de São Paulo. 2007. 107 f. Dissertação Mestrado.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogás from waste and renewable resources. An introduction**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.
- SÁNCHEZ, E.; BORJA, R.; WEILAND, P.; TRAVIESO, L.; MARTIN, A. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. **Process Biochemistry**. 37. p. 483–489, 2001.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-128/topico-98/Relatório Síntese 2014.pdf>> Acesso em 22/12/2017

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria**. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), 2015.

FERNÁNDEZ, A.; SÁNCHEZ, A.; FONT, X. Anaerobic co-digestion of a simulated organic Fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 26, p. 22-28, 2005.

FRIEHE, J.; WEILAND, P.; SCHATAUER, A. Fundamentos da fermentação anaeróbia. In: ROHSTOFFE, F.N. (Ed). **Guia prático do biogás – geração e utilização**. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. 2010. p. 20 -30.

FRIEHE, J.; WEILAND, P.; SCHATAUER, A. Descrição de substratos selecionados. In: ROHSTOFFE, F.N. (Ed). **Guia prático do biogás – geração e utilização**. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. 2010. p. 74 -84.

HENN, A. **Avaliação de dois sistemas de manejo de dejetos em uma pequena propriedade produtora de suínos – condição de partida**. Florianópolis-SC. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 157 f. Dissertação Mestrado.

HENZE, M.; HARREMÕES, P.E. Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors a literature review. **Water Science and Technology**. v.15. p. 1-101, 1983.

IBRAHIM, S. B. S.; LIRA, R. C.; SANTOS, E. L.; AMORIM, E. L. C.; BELEM, T. J. L.; MACEDO, W. V.; SOUZA, S. P. L.; SILVA, S. J. C.; SILVA, J. C.; LIRA, J. P. A. Biodigestão anaeróbia do bagaço da cana-de-açúcar pré-tratado e utilizando excretas de frango como inóculo. **Pubvet**. Maringá, v. 11 n. 12, p. 1254-1262, 2017.

KALAMARAS, S. D., KOTSOPOULOS, T. A. Anaerobic co-digestion of cattle manure and alternative crops for the substitution of maize in South Europe. **Bioresource Technology**. Grécia. n. 172, p. 68-75, 2014.

KUNZ, A; OLIVEIRA, L; PICCININ, L; S. Manual de Análise do Biogás. Florianópolis: Alfakit, 2007.

LI, Y.; ZHANG, R.; LIU, X.; CHEN, C.; XIAO, X.; FENG, L.; HE, Y.; LIU, G. Evaluating methane production from anaerobic mono- and co-digestion of kitchen waste, corn stover, and chicken manure. **Energy&fuels**. China. n.27, p. 2085-2091, 2013.

LUCAS JUNIOR, J. **Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios**. Jaboticabal. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 1994, 113 f. Tese Livre Docência.

LUCAS JUNIOR, J.; SILVA, F. M. Aproveitamento de resíduos agrícolas para a geração de energia. In: Congresso brasileiro de engenharia agrícola, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais**. Lavras/MG: UFLA/SBEA, 1998. p. 63-87.

LUCAS JUNIOR, J.; SANTOS, T. M. B. Aproveitamento de resíduos da indústria avícola para a produção de biogás. In: Simpósio sobre resíduos da produção avícola, 2000. **Anais**. Concórdia – SC. 2000.

MAGALHÃES, A. P. T. **Biogás: um projeto de saneamento urbano**. São Paulo: Nobel, 1986. 120 p.

MATTER, J. M. Co-digestão de resíduos de incubatório e águas residuárias agroindustriais: fase batelada. In: Simpósio internacional sobre gerenciamento de resíduos agropecuários e agroindustriais, 2, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu. Concórdia: SBERA, 2011. v. 2. p. 1-4.

- MATTER, J. M. **Co-digestão de resíduos de incubatório de aves e águas residuárias agroindustriais**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 56p. Dissertação Mestrado 2011.
- Ministério do Meio Ambiente. <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gestC3A3o-de-resC3ADduos-orgC3A2nicos#legislacao><Acesso em 01 de maio 2018>.
- MONTORO, S. B. **Co-digestão de batata doce com dejetos de bovinos leiteiros: uma avaliação técnica e econômica para produção de energia e biofertilizante**. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 91p. Dissertação Mestrado 2017.
- MORAES, L. M. **Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de lodos de esgotos provenientes de reatores anaeróbios sequenciais**. Campinas - SP. Universidade Estadual de Campinas, 2005. Tese Doutorado.
- MORAES, L. M. **Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de dejetos oriundos de atividades zootécnicas**. Campinas - SP. Universidade Estadual de Campinas, 2000. Dissertação Mestrado.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão, a alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1992. 93p.
- OLIVEIRA, A. P. S.; PINHEIRO, E. F. M.; ARAUJO, S. C. Desempenho da palha de feijão como meio filtrante no tratamento da água residuária da suinocultura. **Revista Diversidade e Gestão**. Seropédica, n.2, p. 198-206, 2017.
- ORRICO JÚNIOR, M. A. P. **Avaliação dos processos de biodigestão anaeróbia e compostagem em dejetos de suínos: produção de biogás, biofertilizante e composto**. Jaboticabal. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2007, 95f. Dissertação Mestrado.
- ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J.; ORRICO JÚNIOR, M.A.P. Caracterização e biodigestão anaeróbia dos dejetos de caprinos. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 639-647, 2007.
- ORRICO, A. C. A.; LOPES, W. R. T.; MANARELLI, D. M.; ORRICO JUNIOR, M. A. P.; SUNADA, N. S. Codigestão anaeróbia dos dejetos de bovinos leiteiros e óleo de descarte. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.36, n.3, p.537-545, 2016.
- ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Avaliação de parâmetros da biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos alimentados com dietas à base de milho e sorgo. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 600-607, 2010.
- ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 399-410, 2011.
- ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; LUCAS JÚNIOR, J. Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.546-554, 2010.
- PIEROTTI, S. M. **Avaliação da partida de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), em escala real, sob condições hidráulicas desfavoráveis**. São Carlos-SP. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007, 141 f. Dissertação Mestrado.
- POSTEL, J.; JUNG, U.; FISCHER, EL.; SCHOLWIN, F.; WEIDEL, T.; GATTERMANN, H.; SCHATTAUBER, A.; WEILAND, P. Tecnologia de usinas para a produção de biogás. In:
- SAGULA, A. L. **Biodigestão anaeróbia de cama de frango em co-digestão com caldo de cana-de-açúcar**. Botucatu - SP. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. 2012. 56 f. Dissertação de Mestrado.

- SAGULA, A. L. **Biodigestão anaeróbia da fração líquida da cama de frango triturada e peneirada: efeito da diluição e do uso de reciclo**. Botucatu - SP. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. 2017. 61 f. Tese de doutorado.
- SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, 44, p. 88-94, 1984.
- VIEIRA, W. ; SILVA, F. C. Análises de fertilizantes minerais, organominerais e corretivos. In: SILVA, F. C. (Ed). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Embrapa informação tecnológica. 2009. p. 235-395.
- XAVIER, C. A. N.; LUCAS JUNIOR, J. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 212-223, 2010.
- XAVIER, C. A. N.; SANTOS, T. M. B., LUCAS JUNIOR, J. Digestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros: efeito da dieta e da adição de caldo de cana-de-açúcar. **Archivos de zootecnia**. Córdoba, v. 65 n. 250, p. 131-138, 2016.
- XAVIER, A. N. C. **Caldo de cana-de-açúcar na biodigestão anaeróbia com dejetos de vacas em lactação sob diferentes dietas**. Jaboticabal - SP. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 2009. 102 f. Tese Doutorado.
- ZANATO, J. A. F. **Produção e qualidade do biogás gerado com os dejetos de diferentes espécies animais**. Jaboticabal – SP. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias 2014, 112 f. Tese Doutorado
- ZANATTA, F. L. **Produção de metano usando cama de aviário com vistas a suprir as necessidades energéticas do período de aquecimento de frangos de corte**. Viçosa - MG. Universidade Federal de Viçosa, 2011. Tese Doutorado.
- YE, J.; LI, D.; SUN, Y.; WANG, G.; YUAN,Z.; ZHEN, F.; WANG, Y. Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure. **Waste Management**, Guangzhou, n.33, p. 2653-2658, 2013.