



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS DEJETOS DE SUÍNOS COM  
BATATA DOCE OU MANDIOCA EM DIFERENTES RELAÇÕES C/N**

**LISANDRA MARAIA VILLA**

Dourados, MS  
Setembro de 2018



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS DEJETOS SUÍNOS COM BATATA DOCE  
OU MANDIOCA EM DIFERENTES RELAÇÕES C/N**

LISANDRA MARAIA VILLA

Zootecnista

Orientadora: Profa. Dra. Ana Carolina Amorim Orrico  
Coorientador: Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD como parte das exigências para obtenção do título de Mestre do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia

Dourados, MS  
Setembro de 2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

V713c Villa, Lisandra Maraia

Co-digestão anaeróbia dos dejetos de suínos com batata doce ou mandioca em diferentes relações C/N / Lisandra Maraia Villa -- Dourados: UFGD, 2018. 78f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Ana Carolina Amorim Orrico

Co-orientador: Jorge de Lucas Júnior

Dissertação (Mestrado em Zootecnia)-Universidade Federal da Grande Dourados

Inclui bibliografia

1. acidificação. 2. carboidratos. 3. metano. 4. potencial energético. 5. tuberosas. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.**

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS DEJETOS DE SUÍNOS COM BATATA DOCE  
OU MANDIOCA, EM DIFERENTES RELAÇÕES C/N**

por

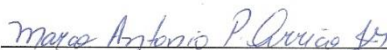
**LISANDRA MARAIA VILLA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título  
de MESTRE EM ZOOTECNIA

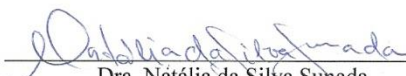
Aprovada em: 14/09/2018



\_\_\_\_\_  
Dra. Ana Carolina Amorim Orrico  
Orientadora – UFGD/FCA



\_\_\_\_\_  
Dr. Marco Antonio Previdelli Orrico Junior  
UFGD/FCA



\_\_\_\_\_  
Dra. Natália da Silva Suñada  
UNIGRAN/MV

## **BIOGRAFIA DA AUTORA**

**Lisandra Maraia Villa**, natural do município de Fernandópolis-SP, nascida no dia 9 de janeiro de 1988, filha de Claudemir Aparecido Villa e Aparecida José Maraia Villa. Criada na cidade de Estrela D'Oeste – SP, onde viveu por 18 anos. Em 2011 participou do programa de intercâmbio IAESTE no 'Department of Animal Science at the University of Göttingen/ Alemanha.' sob orientação do Mr. Dipl. Ing. agr. E. Tönges. No ano de 2015 graduou-se em Zootecnia pela Universidade Estadual de São Paulo, UNESP - Campus de Jaboticabal. No ano de 2016 deu início às atividades como aluna de mestrado matriculada regularmente no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, área de concentração Produção Animal, Dourados – MS, sendo bolsista da CAPES por 18 meses.

*“Se cumpres o teu dever não aspiras a outro prêmio que não  
seja a consciência tranqüila,  
quem te poderá fazer o mal, se procuras somente o bem?”*

Francisco Cândido Xavier

## DEDICATÓRIA

*Dedico primeiramente a Olorum, Oxalá e Ifá que através da intuição mostraram-me o quanto a humildade e a caridade são as pérolas da existência e aí então, deram mais sentido a minha vida.*

*Dedico aos meus pais e ao meu irmão Marco Antônio, que sempre e principalmente nos momentos difíceis, apareceram com ideias e ideais novos, com o amor e a luz necessária para me dar força, paciência e entendimento para muitas questões da vida. Dedico ao meu companheiro, meu homem e meu amor Matheus.*

*Dedico aos meus filhos, que ainda não chegaram mas chegarão e então poderão entender mais da minha batalha em transformar esse mundo em um mundo melhor.*

*E a minha Vó Beatriz, que mesmo de longe se mostra na força e doçura do feminino, das histórias, das lembranças e da saudade.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFGD e ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia pela oportunidade de realização desse trabalho e a todos os docentes e administrativos que colaboraram no meu crescimento pessoal.

Agradeço com profundo reconhecimento à professora Ana Carolina, por ter me dado a oportunidade de trabalhar com o que eu queria e me dar subsídios para a realização desse trabalho. Por sua paciência e auxílio com minhas reais dificuldades e então crescimento e conclusão desse trabalho. Sem você eu continuaria no escuro!

Agradeço com muito carinho ao meu coorientador Jorge de Lucas Jr., pessoa de luz, que sempre somou e me direcionou, com sugestões, brincadeiras e verdades. Agradeço por ter disponibilizado seu tempo em me ajudar com tantas questões pessoais que ocorreram durante esse trabalho. Por me incentivar sempre!

A todos do grupo de pesquisas de Manejo de Resíduos, da UFGD, em especial à Dra. Natália, pelo real auxílio em todas as etapas desse trabalho e a todos do Departamento de Engenharia Rural, UNESP Jaboticabal, em especial à Aline e a Luana que se tornaram mais que colegas de laboratório.

Ao homem da minha vida, Matheus. Não há palavras para descrever o quão difícil e maravilhoso tem sido nosso caminho e nossa construção. Obrigada por sempre estar aí para me mostrar mais da vida e também por entender meus momentos de ausência e dificuldades durante esse projeto.

Agradeço aos meus sogros, Hilda e Giba, que de forma carinhosa e construtiva me auxiliaram a vencer muitas batalhas que ocorriam concomitante a esse trabalho.

De forma especial também agradeço aos meus amigos irmãos, que se mostraram presentes quando tive dificuldades, sendo elas emocionais ou de saúde, queridos que estavam sempre ali e me auxiliaram de forma muito bonita e gratificante, esse trabalho não teria a mesma essência sem vocês, já que esse se forma a partir do contato, da troca e do aprendizado gerado mutuamente.

Agradeço às minhas duas melhores companhias Gaia e Toph, por simplesmente existirem e tornarem a minha vida mais alegre.



A todos os brasileiros que pagam seus impostos e assim tornam possível que a Coordenação de Pessoal de Nível Superior (CAPES) nos auxilie com bolsas e também auxílios financeiros às pesquisas.

A todos que me auxiliaram e também me atrapalharam durante essa pesquisa, meu muito obrigada.

## SUMÁRIO

|   | Página |
|---|--------|
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....   | XI     |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....   | XII    |
| <b>RESUMO</b> .....   | 14     |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | 15     |
| <b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....   | 16     |
| <b>CAPÍTULO 1. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....  | 18     |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....   | 25     |
| <b>CAPÍTULO 2. Co-digestão anaeróbia dos dejetos de suínos com batata doce ou mandioca em diferentes relações C/N</b> ..... | 31     |
| <b>RESUMO</b> .....   | 33     |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | 34     |
| 2.1. INTRODUÇÃO .....   | 35     |
| 2.2. MATERIAL E MÉTODOS .....   | 37     |
| <b>2.2.1 Ensaio preliminar – Biodigestores modelo batelada</b> .....  | 38     |
| <b>2.2.2 Ensaio de co-digestão – Biodigestão de abastecimento semi-contínuo</b> .....                                       | 39     |
| <b>2.2.3 Metodologias Aplicadas</b> .....   | 41     |
| 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 42     |
| <b>2.3.1. Ensaio preliminar – Biodigestores bateladas</b> .....   | 42     |
| <b>2.3.2. Biodigestores semi-contínuos</b> .....  | 51     |
| 2.4. CONCLUSÃO .....  | 56     |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....   | 57     |
| <b>IMPLICAÇÕES</b> .....  | 63     |

## LISTA DE TABELAS

|  | Página    |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 2. CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS DE SUÍNOS, BATATA DOCE E MANDIOCA EM DIFERENTES RELAÇÕES C/N.....</b>   | <b>31</b> |
| TABELA 1. Caracterização dos substratos utilizados nos biodigestores modelo batelada. ....   | 64        |
| TABELA 2. Descrição das quantidades (g) de dejetos, batata doce e mandioca nos tratamentos que compuseram o ensaio com biodigestores modelo batelada. ....   | 65        |
| TABELA 3. Caracterização dos substratos utilizados nos biodigestores de alimentação semi-contínua. ....  | 66        |
| TABELA 4. Quantidades de dejetos, batata doce e mandioca nos tratamentos que compuseram o ensaio com biodigestores de alimentação semi-contínua.....   | 67        |
| TABELA 5. Teores e reduções dos ST e SV no afluente e efluente em biodigestores modelo batelada na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca com diferentes relações C/N. ....                   | 68        |
| TABELA 6. Produções específicas de biogás por quantidades de ST e SV adicionadas em biodigestores modelo batelada na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca com diferentes relações C/N. .... | 69        |
| TABELA 7. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) no afluente e efluente para os diferentes tratamentos. ....   | 70        |
| TABELA 8. Teores (g) e reduções de ST e SV, no afluente e efluente em biodigestores de alimentação semi-contínua na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca. ....                              | 71        |
| TABELA 9. Produção de biogás diária e produção específica de biogás por quilogramas de ST e SV adicionados, em biodigestores semi-contínuos na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca.....    | 72        |

## LISTA DE FIGURAS

|   | Página    |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 2. CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS DE SUÍNOS, BATATA DOCE E MANDIOCA EM DIFERENTES RELAÇÕES C/N.....</b>  | <b>31</b> |
| Figura 1. Valores de pH no afluente e efluente em biodigestores modelo batelada, na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca com diferentes relações C/N.  | 73        |
| Figura 2. Produção total de biogás obtidos em biodigestores modelo batelada, na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca com diferentes relações C/N. ....   | 74        |
| Figura 3. Produção acumulada de biogás no tempo de retenção hidráulica de 92 dias, obtidos em biodigestores modelo batelada, na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca com diferentes relações C/N. .... | 75        |
| Figura 4. Alcalinidade, acidez volátil e pH, no afluente (A) e efluente (B) em biodigestores semi-contínuos na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca. ....  | 76        |
| Figura 6. Produção específica de metano por SV adicionado e teores de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> , em biodigestores semi-contínuos na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca. ....                | 78        |

**LISTA DE ABREVIATURAS**

AGVs: ácidos graxos voláteis

BD: batata doce

C: carbono

CH<sub>4</sub>: metano

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono

DS: dejetos de suínos

M: mandioca

MM: matéria mineral

pH: potencial hidrogeniônico

ST: sólidos totais

SV: sólidos voláteis

TRH: tempo de retenção hidráulica

## RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a melhor condição de co-digestão anaeróbia de dejetos de suínos (DS), batata doce (BD) e mandioca (M) em biodigestores modelo batelada e de alimentação semi-contínua (segunda etapa), para estabelecer as melhores relações C/N para esses substratos. Foram utilizados biodigestores modelo batelada para a avaliação das produções específicas de biogás durante o processo de biodigestão em diferentes relações C/N (10/1; 13/1; 17/1; 22/1), conduzido em delineamento inteiramente casualizado, composto por um tratamento controle contendo apenas DS, quatro tratamentos com adição de BD e quatro tratamentos com adição de M, todos com quatro repetições. Foram mensuradas para a avaliação dos resultados: as reduções de ST e SV e as produções específicas de biogás. Os tratamentos BD 10/1; 13/1; 17/1; 22/1 e M 10/1 obtiveram as maiores reduções de ST e para as reduções de SV, os tratamentos Controle, BD 10/1 e M 10/1. As maiores produções específicas de biogás por ST adicionados (286 e 270 L kg<sup>-1</sup>) foram obtidas por BD10/1 e M10/1 e para SV adicionados (331, 323, 304 e 301 L kg<sup>-1</sup>) para BD10/1, M10/1, Controle e BD 13/1 respectivamente. Dentre os parâmetros estudados os tratamentos BD 10/1 e M 10/1 apresentaram os melhores resultados e conseqüentemente foram selecionados para compor a segunda etapa. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (controle, BD 10/1 e M 10/1) e cinco repetições. A eficiência dos tratamentos foi avaliada por meio da redução dos constituintes ST e SV e produções específicas de biogás, assim como sua composição (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>), alcalinidade e acidez volátil. O tratamento controle diferiu dos demais (P<0,05) e apresentou menor desempenho. Os tratamentos em co-digestão não diferiram entre si (P<0,05) para o rendimento de biogás (0,968 e 0,948 L g<sup>-1</sup> SV<sub>adic</sub>), metano (0,633 e 0,586 L g<sup>-1</sup> SV) e reduções de ST (75,7 e 76,0%) e SV (85,7 e 85,7%) para os tratamentos BD e M respectivamente. Dessa forma a co-digestão do DS com BD ou M, em biodigestores de alimentação semi-contínua, além de promover um aumento na produção de biogás, proporcionou uma melhor qualidade deste, acrescentando o teor de CH<sub>4</sub>.

**PALAVRAS-CHAVE:** acidificação, carboidratos, metano, potencial energético, tuberosas.

## ABSTRACT

This work was carried out with the objective of evaluating the best anaerobic co-digestion condition of swine waste (SW), sweet potato (SP) and cassava (C) in biodigestors batch model and semi-continuous feed (second stage) to establish the best C/N ratios for these substrates. A batch model was used to evaluate the specific biogas production during the biodigestion process in different C/N ratios (10/1, 13/1, 17/1, 22/1), conducted in a completely randomized design, a control treatment containing only SW, four treatments with addition of SP and four treatments with addition of C, all with four replicates. The reductions of TS and VS and specific biogas productions were measured for the evaluation of the results. The treatments SP 10/1; 13/1; 17/1; 22/1 and C 10/1 obtained the highest TS reductions and for VS reductions, Control, SP 10/1 and C 10/1 treatments were higher. The highest specific biogas productions by TS added (286 and 270 L kg<sup>-1</sup>) were obtained by SP10 / 1 and C10 / 1 and for added VS (331, 323, 304 and 301 L kg<sup>-1</sup>) for SP10 / 1, C10 / 1, Control and SP 13/1 respectively. Among the studied parameters the treatments SP 10/1 and C 10/1 presented the best results and consequently were selected to compose the second stage. A completely randomized design with three treatments (control, SP 10/1 and C 10/1) and five replications were used. The efficiency of the treatments was evaluated by means of the reduction of constituents TS and VS and specific productions of biogas, as well as their composition (CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>), alkalinity and volatile acidity. The control treatment differed from the others ( $P < 0.05$ ) and presented lower performance. Co-digestion treatments did not differ ( $P > 0.05$ ) for the biogas yield (0.968 and 0.948 L g<sup>-1</sup> VS<sub>adic</sub>), methane (0.633 and 0.586 L g<sup>-1</sup> VS) and TS reductions (75.7 and 76.0%) and VS (85.7 and 85.7%) for the SP and C treatments respectively. Thus, the co-digestion of SW with SP or C, in semi-continuous feed biodigesters, in addition to promoting an increase in biogas production, provided a better quality of this, adding the content of CH<sub>4</sub>.

**KEYWORDS:** acidification, carbohydrates, energy potential, methane, tuberoses.

## CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A geração de resíduos nas propriedades suinícolas causa impactos socioambientais, diretamente relacionadas ao local em que se insere, contaminando os solos e os corpos hídricos, além de causarem problemas relacionados a odores desagradáveis, exposição de patógenos e prejuízos financeiros aos produtores, que por lei precisam dar um destino correto ao dejetos produzido.

Entre as soluções para regular esse problema encontra-se a biodigestão anaeróbia que permite tratar esses resíduos de forma eficiente e ainda torna-o rentável, pela produção de metano e biofertilizante de qualidade. A biodigestão é um processo biológico em que microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio e é utilizado no tratamento de resíduos orgânicos, tanto industriais como agrícolas.

Na literatura atual existem trabalhos relacionados a uma melhor elucidação do processo no intuito de melhorar e baratear a técnica. A co-digestão é uma tecnologia que vem sendo intensamente estudada para melhorar a monodigestão, já que este consiste no uso de dois ou mais substratos digeridos conjuntamente e assim podem diminuir as limitações de cada resíduo e ainda melhorar o processo de degradação e produção de biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O uso de um único substrato em digestão pode apresentar limitações ao processo de degradação como valores de pH fora da faixa ideal; concentrações de N tóxicas aos microrganismos degradadores ou insuficientes para o crescimento dos mesmos; e concentração de carga orgânica que podem diminuir a eficiência do sistema e até mesmo levar a falência do processo. A correta relação C/N em um processo de biodigestão anaeróbia é importante do ponto de vista microbiológico, melhorando a atividade desses microrganismos, já que equilibra os nutrientes necessários para as diferentes fases do processo de biodigestão (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O dejetos de suínos possui bom resultado quando empregado no processo de biodigestão, gerando um elevado rendimento de biogás e biofertilizante de qualidade. Possui elevada concentração de nitrogênio, cuja importância está relacionada com o crescimento microbiano, além de manter o pH estável por suacapacidade de tamponamento (PANICHNUMSIN et al., 2012). Mesmo sendo este um substrato muito utilizado na prática da biodigestão anaeróbia ainda pode ter seu potencial de produção de biogás melhorado quando fontes de carbono são adicionadas ao sistema possibilitando o equilíbrio da relação C/N do substrato para uma faixa mais adequada ao crescimento dos microrganismos fermentadores.



Os resíduos agrícolas vêm sendo amplamente estudados no Brasil e no exterior para serem utilizados associados a dejetos em sistemas de tratamentos, uma vez que as fontes vegetais podem equilibrar as deficiências de carbono encontradas nos dejetos. Essa associação beneficia o processo de biodigestão e melhora sua estabilidade, gera um maior potencial de produção de biogás e metano, melhorando a redução dos constituintes orgânicos (NESHAT et al., 2017).

Raízes como batata doce e mandioca são amplamente produzidas no Brasil. Essas raízes e também as sobras das mesmas, que são desperdiçadas nos pontos de comercialização e produção, são exemplos dos substratos que podem ser utilizados no processo, já que possuem elevadas concentrações de carboidratos que atuam equilibrando a relação C/N quando associados a dejetos animais. Promovendo assim benefícios as propriedades rurais pela geração de energia na forma de biogás e biofertilizante.

Portanto, o objetivo desse trabalho foi o de avaliar a influência do ajuste da relação C/N sobre a codigestão de dejetos de suínos e fontes de carbono (batata doce e mandioca), sobre as reduções dos constituintes sólidos e os rendimentos de biogás e metano em biodigestores semi-contínuos.

A presente dissertação é composta por dois capítulos. O primeiro capítulo contém uma revisão de literatura escrita conforme as normas vigentes do Programa de Pós-graduação em Zootecnia da Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD. O segundo capítulo foi redigido mediante as normas de publicação da Revista Ciência Rural, encontrada no seguinte endereço eletrônico: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_serial&pid=0103-8478&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_serial&pid=0103-8478&lng=en&nrm=iso).

## CAPÍTULO 1. REVISÃO DE LITERATURA

A criação de suínos ao longo dos anos expandiu em virtude da crescente demanda do mercado consumidor. Desde a década de 90 a inovação tecnológica se intensificou, gerando agilidade, facilidade e abertura econômica. No entanto, as populações de baixa renda no meio rural ainda precisam de uma reestruturação em relação a disponibilização e incentivo desses avanços tecnológicos (SILVEIRA, 2008).

A agricultura familiar possui forte vínculo com a suinocultura no Brasil, possuindo mais da metade da participação na criação (59%). É responsável pela maior parte do abastecimento interno de alimentos, representando 84,4% das propriedades rurais brasileiras, com área média dos estabelecimentos de 18,37 hectares (IBGE, 2006).

A criação de suínos, mesmo pela agricultura familiar, passou por transformações fundamentais na forma de criação a partir da década de 60, como confinamento total, rações formuladas a base de soja e milho e uso de raças especializadas (ESSIG, 2015). Deixando de ser conhecida apenas por uma agricultura de subsistência, e passando para a condição de propriedade com potencial de produção.

A geração de efluentes na suinocultura tanto relacionada a agricultura familiar como no agronegócio possui relação com os aspectos construtivos e o manejo das instalações. As criações se dão em áreas com piso do tipo compacto ou parcialmente ripado, onde os animais ficam confinados, produzindo em uma pequena área, elevada quantidade de resíduos que são gerenciados de forma líquida (GOMES et al., 2014).

Os dejetos de suínos possuem um elevado teor de matéria orgânica (STEINMETZ et al., 2009), com considerável teor de nitrogênio, fósforo e potássio (ORRICO JÚNIOR; ORRICO; LUCAS JÚNIOR, 2010), que se não forem adequadamente tratados podem levar a eutrofização dos corpos d'água (LUCAS JÚNIOR, 1994).

Por causarem sérios problemas ambientais no que se refere ao desperdício de água e impacto poluidor do resíduo, há a necessidade do emprego de tecnologias que minimizem o desperdício de água e tratem a matéria orgânica, produzindo energia limpa e reciclando os nutrientes dentro do sistema (ZHOU et al., 2016).

A biodigestão anaeróbia é uma alternativa eficiente ao tratamento de resíduos e pode ter como substrato diferentes tipos de resíduos orgânicos para produzir biofertilizante e biogás (YU; SCHANBACHER, 2010). Durante o funcionamento adequado do processo, a carga orgânica do afluente é reduzida pelos microrganismos anaeróbios e conseqüentemente ocorre a

produção de biogás (AMORIM; LUCAS JÚNIOR; RESENDE, 2004; COCA et al., 2016; EL-MASHAD; ZHANG, 2010).

O uso de biodigestores em pequenas propriedades produtoras de suíno agrega valor à produção por tratar os resíduos de forma eficiente e segura além de produzir energia na forma de biogás e biofertilizante. Esses benefícios podem melhorar a qualidade e produtividade dessas granjas, incentivando a permanência do trabalhador no campo (BARICHELLO et al., 2015). Na composição do biogás há o gás metano que possui grande poder calorífico, podendo ser utilizado na forma de calor térmico ou como combustível em motogeradores na produção de energia elétrica (BACIOCCHI et al., 2013). Essa energia térmica e/ou elétrica pode ser utilizada nos maquinários (com motor adaptado), nas atividades diárias da granja e na casa do produtor, diluindo os custos de produção.

A biodigestão anaeróbia exige condições favoráveis para os microrganismos que de forma conjunta transformam material orgânico, principalmente, em dióxido de carbono e metano, basicamente por meio das fases de: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (AQUINO; STUCKEY, 2008).

Na primeira fase há a hidrólise de moléculas grandes como carboidratos, proteínas e gorduras que são quebradas por enzimas, dando origem a compostos menores. A velocidade de degradação nessa fase ocorre em função da concentração e características dos substratos envolvidos. Se o substrato for de difícil degradação, a velocidade dessa etapa pode ser considerada limitante ao processo (GERARDI, 2003). Os produtos dessa primeira fase variam em função do substrato utilizado, uma hidrólise de glicosídeos tem como produto a formação de açúcares e de proteínas os aminoácidos.

Na acidogênese ocorre a transformação dos produtos gerados na primeira fase em ácidos orgânicos (ARRUDA et al., 2002), como álcoois, propiônico, butírico, láctico além de hidrogênio e gás carbônico. Um substrato com alta concentração de carboidratos de fácil degradação, como o amido, pode levar a um rápido incremento de ácidos nessa fase (DONARCK, 2012) e conseqüente queda no pH.

Na acetogênese ocorre a metabolização dos ácidos graxos produzidos na acidogênese em acetato, hidrogênio e gás carbônico (PARAWIRA, 2012). A metanogênese é a última fase e nela ocorre a formação de metano a partir do acetato, hidrogênio e gás carbônico. O gás metano ( $\text{CH}_4$ ) é um gás com alto poder de queima que pode ser utilizado como energia térmica ou elétrica, substituindo a utilização de combustíveis fósseis (SALMINEN; RINTALA, 2002), diluindo os custos de produção do produtor rural.

As arqueas metanogênicas são as mais sensíveis às variações de pH durante o processo. Um pH fora da faixa ideal a elas causa diminuição na população e conseqüentemente na velocidade do processo de metanogênese (PONTES, 2003). O mesmo autor cita que a faixa ótima do pH para as arqueas é de 6,3 a 7,8. As fermentativas se adaptam a uma maior variação de pH, entre 4,0 e 8,5 (HWANG et al., 2004). O ideal para um bom andamento do processo de biodigestão é um pH na faixa de 7 (MOURA, 2012).

O tempo de retenção hidráulica (TRH), teor de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), temperatura, características que compõem o substrato, entre outros, são de extrema importância no processo de biodigestão anaeróbia, influenciando em seu andamento, visto que as diferentes etapas e microrganismos possuem necessidades distintas para que o processo de degradação ocorra de forma satisfatória (JANG et al., 2014; SOUZA et al., 2008).

Dublen e Steinhäuser (2011) citam que o pH ácido ou alcalino será responsável pela forma final como o CO<sub>2</sub> se apresentará no sistema. Em pH próximo a 13, o CO<sub>2</sub> se encontrará totalmente dissolvido em carbonato no substrato, já com pH 4, o mesmo se encontrará como molécula livre, na forma gasosa. O CO<sub>2</sub> diluído no substrato proporcionará melhoras na qualidade do substrato, já estando ele como molécula livre (forma gasosa), se tornará componente do biogás, influenciando de forma negativa a qualidade do mesmo.

Substratos caracterizados por alta relação C/N (baixa concentração de nitrogênio) possuem pequena capacidade de tamponamento, e se possuírem alta biodegradabilidade podem ainda produzir grandes quantidades de AGV durante o processo. Por outro lado, os substratos que possuem baixa relação C/N (alta concentração de nitrogênio) podem gerar altas concentrações de amônia superando os requisitos para o crescimento microbológico, podendo levar o processo à falência por inibir os microrganismos metanogênicos (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Estudos antigos já indicavam como a relação C/N interfere no processo de digestão. Como o realizado por Sievers e Brune (1978) em escala laboratorial utilizando digestores em frascos erlenmeyer e em escala laboratorial, com dejetos de suínos em diferentes relações C/N (ajustada com a adição de glicose e uréia), concluíram que as maiores produções de CH<sub>4</sub> ocorreram para as maiores inclusões de relação C/N, mas deixaram o meio muito instável, operando à beira da falha. Biodigestores operados com relação C/N baixa produziram menos biogás, mas por sua alta capacidade de tamponamento permaneceram mais estáveis. Em seu estudo, definiram a relação C/N estável na faixa de 15,5 a 19/1, tendo em consideração a produção de metano e estabilidade do processo. Indicando que uma relação C/N de 16/1 possa fornecer uma maior estabilidade operacional.

Elevadas concentrações de nitrogênio ou carbono podem inibir o processo, levando-o a falha. Dejetos suínos possuem uma alta concentração de nitrogênio (baixa relação C/N) que pode levar a uma maior produção de amônia livre e até diminuição da produção de CH<sub>4</sub> (HANSEN; ANGELIDAKI; AHRING, 1998). Por outro lado possui um alto poder de tamponamento que pode proteger o processo contra possíveis acúmulos de ácidos graxos e queda do pH (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008).

Fontes vegetais podem ser utilizadas para equilibrar as deficiências de carbono encontradas no dejetos de suíno. Esse equilíbrio de um substrato em co-digestão, une a alta capacidade de tamponamento do dejetos, que neutraliza os efeitos dos AGVs às características dos vegetais, que por serem ricos em carboidratos fornecem um balanceamento mais adequado de nutrientes aos microrganismos, incrementando a produção de CH<sub>4</sub> (MATA-ALVAREZ; MACÉ; LLABRÉS, 2000; MOLINUEVO-SALCES et al., 2010). Sendo ideal o equilíbrio da quantidade de cada substrato na co-digestão, para que as características de cada material possam melhorar a qualidade do processo sem diminuir os efeitos positivos que os mesmos podem gerar.

As regiões com clima tropical são as maiores produtoras de biomassa quando comparadas a outras regiões (PARIKKA, 2004). Como resultado de uma biomassa abundante, há a oportunidade de converter localmente esses produtos em bioenergia, com a necessidade de avaliação do potencial de produção de cada biomassa e das fontes tecnológicas utilizadas (GE et al., 2014). O uso de biomassa é uma opção rentável para a geração de energia em pequenas propriedades rurais, aumentando a sustentabilidade local.

A biomassa vegetal é composta por culturas ricas em teor energético, se mostrando uma das principais fontes disponíveis para a geração de energia elétrica nas propriedades rurais (MME, 2014). Essa biomassa vegetal pode ser caracterizada pelos resíduos de colheitas ou pelas *energy crops*, que são cultivos dedicados para a geração de energia (WARD et al., 2008). Na Alemanha, dentre a produção de biogás proveniente de atividades agropecuárias, cerca de 57% provém de *energy crops*.

Nos últimos anos ocorreu um movimento de valorização do material vegetal como fonte de biomassa, assim os resíduos de colheitas podem ser considerados biomassa em uma propriedade rural, se tornando uma fonte de energia capaz de trazer benefícios econômicos e sustentáveis ao produtor.

Dentre as fontes de biomassa importantes para produção de etanol no Brasil estão: cana-de-açúcar, mandioca e batata-doce (MENEZES, 1980). A geração de álcool no Brasil utiliza a cana de açúcar como matéria prima em sua maioria, no entanto, o crescimento

populacional e as necessidades de novas fontes de energia geraram espaço para novas alternativas de matrizes energéticas e a mandioca se destaca como alternativa, visto que possui elevada quantidade de carboidratos e pode ser produzida durante todo o ano (FAO, 2017).

A perda mundial de alimentos para consumo humano na forma de resíduos de processamento é de cerca de 1/3 do total, correspondendo a 1,3 milhões de toneladas (GUSTAVSSON et al., 2011). Segundo dados da Organização da Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) no Brasil o desperdício é de 26 milhões de toneladas por ano ou 41 mil toneladas por dia, que equivale a aproximadamente 10%.

A batata doce (*Ipomoea batatas* L. (Lam.) e a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) são largamente produzidas em regiões de clima tropical e subtropical, e consideradas culturas de destaque na agricultura mundial (ISAMAH, 2004; IYER; MATTINSON; FELLMAN, 2010; SOARES et al., 2014). Possuem vantagens como: resistência à seca, elevada produtividade e adaptação à diferentes climas e sistemas de produção (CONCEIÇÃO, 1987; MEKONNEN; DUGA; TADESSE, 2015). O cultivo dessas raízes no Brasil é diversificado, indo desde cultivos de subsistência, até áreas com plantio industrial, grande emprego de tecnologias e altas produções (MEKONNEN; DUGA; TADESSE, 2015; SCHWENGBER, 2009).

A agricultura familiar é responsável por 87% da produção de mandioca no Brasil (IBGE, 2006) mostrando a importância cultural e econômica dessa raiz ao pequeno produtor. As raízes da batata doce são a parte que possui relevância comercial, oferecendo uma quantidade considerável de fibras, além de alta concentração de energia na forma de carboidratos e amidos (PETERS; TINH; THACH, 2002). Silveira et al. (2008) citam que essa cultura deve ser explorada e afirmam ser uma ótima alternativa para o programa brasileiro de biocombustíveis.

A batata doce contém em torno de 75 a 90% de carboidratos (base na matéria seca), sendo esta fração composta por açúcares, amido, celulose, pectina e hemicelulose. Dentre os açúcares, a sacarose está presente em maior quantidade, com pequena proporção de glicose e frutose (BOUWKAMP, 1985), sendo por essas características considerada uma fonte energética (OTOO; MISSAH; CARSON, 2001).

A composição da mandioca e da batata-doce varia muito com a espécie, idade e condições de cultivo. Segundo Mendes (1992) a mandioca é composta por 90,1% de amido, 1,5% de proteína, 5,6 % de fibras, 0,3% de gorduras e 0,7% de açúcares. A batata doce possui teor de amido de 83%, 2,9% de proteína, 3,8% de fibras, 0,8% de gorduras e 7,8% de açúcares (KOHYAMA; NISHINARI, 1992). Observa-se na composição das duas raízes que a mandioca é mais pobre em teores de nutrientes e possui uma quantidade de amido maior que a batata

doce. O elevado teor de carbono e baixa relação C/N contido nessas tuberosas geram uma baixa capacidade de tamponamento, limitando o processo de biodigestão isolado (PANICHNUMSIN et al., 2006).

Na composição do amido, encontra-se basicamente amilose e amilopectina (LOBO; SILVA, 2003), com uma concentração de 97 a 99% do peso seco do mesmo. Encontra-se também no grânulo de amido os conhecidos por constituintes menores, que são as fibras, proteínas, lipídeos, açúcares solúveis e cinzas que correspondem (em % na matéria seca) na batata doce 0,90; 0,54; 0,64; 1,70 e 0,60 e na mandioca 0,53; 0,47; 0,51; 0,21 e 0,10 respectivamente (RESCHSTEINER, 2005).

Segundo Uda et al. (2008), em seu trabalho sobre a extração e as características dos grânulos de amido de batata doce e mandioca, os autores obtiveram resultados de rendimento de extração e amido de 11,02% e 27,53% para a batata doce e mandioca respectivamente, demonstrando que ocorre maior liberação de grânulos de amido na mandioca.

Coutinho (2007) menciona que cada amido é único na organização e na estrutura dos seus grânulos e geralmente possui estrutura, propriedade e comportamento diferenciado, desse modo, amidos de fontes botânicas diferentes não se comportam da mesma maneira. A classificação do amido varia em função da sua estrutura físico química e da sua susceptibilidade à hidrólise enzimática: a) rapidamente digerível; b) lentamente digerível; c) e amido resistente, que é a fração resistente à ação das enzimas digestivas (UDA et al., 2008). As concentrações de amido resistente na batata doce e na mandioca são de 13,4 e 14,4% respectivamente (RESCHSTEINER, 2005).

Por possuírem alta concentração de carbono, resíduos vegetais isolados não apresentam características ideais para um bom andamento do processo de biodigestão anaeróbia e produção de biogás. Desta forma, a associação destes resíduos com os dejetos de animais de produção pode representar uma alternativa para supera os problemas da biodigestão isolada dos resíduos agrícolas, equilibrando o meio (RIÑO; MOLINUEVO; GARCÍA-GONZÁLEZ, 2011).

A co-digestão anaeróbia é uma técnica que concilia diferentes tipos de substratos com a finalidade de aumentar a produção de biogás (WU et al., 2010), podendo acrescer de 50 a 200% a produção de metano, dependendo das condições de operação do meio e dos materiais utilizados (ALATRISTE-MONDRAGÓN et al., 2006).

Dentre as vantagens da co-digestão, há a diversidade bacteriana presente nesses coprodutos que otimizam a digestão, melhorando o processo de biotransformação (WANG et al., 2012), diminuição da inibição por amônia (WANG et al., 2013; WU et al., 2010), equilíbrio

dos micro e macro nutrientes, e pH (HARTMANN; ANGELIDAKI; AHRING, 2002). Pode colaborar também para o aumento da eficiência das propriedades rurais, sendo que otimiza a manipulação dos resíduos localmente, gerando melhor conversão econômica (MARTINEZ-GARCIA et al., 2007), diluição de compostos tóxicos (ZHANG et al., 2013), e fornecendo maior capacidade tampão (WANG et al., 2012), além do equilíbrio da relação C/N no substrato (HARTMANN; ANGELIDAKI; AHRING, 2002; WANG et al., 2014).

Wu et al. (2010) estudaram sobre a co-digestão de dejetos de suínos e três resíduos agrícolas (hastes de milho, palha de aveia e palha de trigo) com três relações C/N diferentes (16, 20 e 25/1), em biodigestores modelo batelada, temperatura controlada (37°C) e duração de 25 dias. Todas as inclusões (resíduos agrícolas e relações C/N) aumentaram a produção de biogás, sendo que o melhor resultado para o resíduo agrícola foi da co-digestão com hastes de milho, que aumentou a produção em 11,4 vezes sobre o controle e os melhores resultados para a relação C/N foi com relação de 20/1.

Os três resíduos utilizados no experimento de Wu et al. (2010) possuem alta relação C/N, porém também são caracterizados por possuírem elevados teores de lignina que são de difícil degradação, permanecendo praticamente inalterada e tornam a etapa da hidrólise mais lenta, sendo a degradabilidade dessas fontes de carbono é um parâmetro que também deve ser levado em consideração quando utilizados. Sun et al. (2015) citam que a degradação de materiais lignocelulósicos, mesmo que ricos em teores de carbono, possuem difícil degradação, proporcionando uma hidrólise mais lenta.

Panichnumsin et al. (2010) avaliando a co-digestão de dejetos de suínos e polpa de mandioca (resíduo, com menor teor de amido quando comparada com a mandioca *in natura*), obtiveram aumento na produção de biogás quando adicionado a polpa ao dejetos.

Resíduos vegetais possuem elevada concentração de carbono, mas a disponibilidade do mesmo é variável. O mesmo se aplica aos dejetos animais que mesmo sendo fontes de elevada concentração de nitrogênio possuem maior ou menor degradabilidade no processo de biodigestão.

Fountoulakis et al. (2008) afirmam sobre a necessidade de se estudar os possíveis efeitos adversos quanto as composições utilizadas no processo de co-digestão, as quantidades ideais de inclusão e quais conjuntos de resíduos podem ser co-digeridos juntos. As proporções ideais de inclusão de cada substrato não podem ser apenas definidas, mas sim estudadas para cada caso e cada material (ESPOSITO et al., 2012; PONSÁ; GEA; SÁNCHEZ, 2011).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALATRISTE-MONDRAGÓN, F. et al. Anaerobic codigestion of municipal, farm, and industrial organic wastes: a survey of recent literature. **Water Environment Research**, v. 78, n. 6, p. 607-636, jun. 2006.

AMORIM, A. C.; LUCAS JÚNIOR, J.; RESENDE, K. T. Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos obtidos nas diferentes estações do ano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 16-24, jan./abr. 2004.

AQUINO, S. F.; STUCKEY, D. C. Integrated model of the production of soluble microbial products (SMP) and extracellular polymeric substances (EPS) in anaerobic chemostats during transient conditions. **Biochemical Engineering Journal**, v. 38, p.138-146, 2008.

ARRUDA, M. H. et al. Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, n.2, p. 1-8, dez. 2002.

BACIOCCHI, R. et al. Performance of a biogas upgrading process based on alkali absorption with regeneration using air pollution control residues. **Waste Management**, v. 33, n.12, p. 2694-2705, 2013.

BARICHELLO, R., et al. O uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região noroeste do rio grande do sul. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31., 2011, Belo Horizonte. **Inovação Tecnológica...** Belo Horizonte: ABEPRO, 2011. p. 1-9.

BOUWKAMP, J. C. Utilization. In: BOUWKAMP, J. C. (Ed.). **Sweet potato products: a natural resource for the tropics**. Flórida: Library of Congress Cataloging, 1985. Parte II, p. 137-259.

CHEN, Y; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, jul. 2008.

COCA, F. O. C. G. et al. Produção de biogás com dejetos de suínos – efeito de energia líquida e ractopamina da dieta. **Archivos de Zootecnia**, Córdoba, v. 65, n. 252, p. 507-512, 2016.

CONCEIÇÃO, A. J. **A mandioca**. São Paulo: Livraria Nobel S. A., 1987. 382 p.

COUTINHO, A. P. C. **Produção e caracterização de maltodextrinas a partir de amidos de mandioca e batata-doce**. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

DORNACK, C. Biogas production from organic waste and biomass - fundamentals and current situation. **Journal Vietnamese Environment**, v. 3, n. 1, p. 43-49, 2012.

DUBLIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. New York: Wiley-VCH, 2011.

EL-MASHAD, H. M.; ZHANG, R. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 11, p. 4021-4028, jun. 2010.

ESPOSITO, G. et al. Anaerobic co-digestion of organic wastes. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 11, n. 4, p. 325-341, dez. 2012.

ESSIG, M. **Lesser beasts: a snout-to-tail history of the humble pig**. New York: Basic Books, 2015.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/home/en/>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

FOUNTOULAKIS, M. S. et al. Potential for methane production from typical Mediterranean agro-industrial by-products. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 2, p. 155-161, fev. 2008.

GE, X. et al. Biogas energy production from tropical biomass wastes by anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 169, p. 38-44, out. 2014.

GERARDI, M. H. **The microbiology of anaerobic digesters**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 188 p.

GOMES, L. P. et al. Indicadores de sustentabilidade na avaliação de granjas suínolas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 21, p. 143-154, abr./jun. 2014.

GUSTAVSSON, A., et al. Cost of disorders of the brain in Europe 2010. **European Neuropsychopharmacology**, v. 21, n. 10, p. 718-779, out. 2011.

HANSEN, K. H.; ANGELIDAKI, I.; AHRING, B. K. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. **Water Research**, v. 32, n. 1, p. 5-12, jan. 1998.

HARTMANN, H.; ANGELIDAKI, I.; AHRING, B. K. Co-digestion of the organic fraction of municipal waste with other waste types. In: MATA-ÁLVAREZ, J. (Ed.). **Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. United Kingdom: IWA Publishing, 2002. p. 181-200.

HWANG, M. H. et al. Anaerobic bio-hydrogen production from ethanol fermentation: the role of pH. **Journal of Biotechnology**, v. 111, n. 3, p. 297-309, ago. 2004.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006: Agricultura familiar. Primeiros resultados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. 265 p.

ISAMAH, G. K. ATPase, peroxidase and lipoxygenase activity during post-harvest deterioration of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) root tubers. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 54, p. 319-323, mai. 2004.

IYER, S.; MATTINSON, D. S.; FELLMAN, J. K. Study of the early events leading to cassava root postharvest deterioration. **Tropical Plant Biology**, Pullman, v. 3, p. 151-165, jul. 2010.

JANG, H. M. et al. Bacterial and methanogenic archaeal communities during the single-stage anaerobic digestion of high-strength food wastewater. **Bioresource Technology**, v. 165, p. 174-182, 2014.

KAYHANIAN, M. Ammonia inhibition in high-solids biogasification: an overview and practical solutions. **Environmental Technology**, v. 20, n. 4, p. 355-365, 1999.

KAYHANIAN, M.; TCHOBANOGLOUS, G. Computation of C/N ratios for various organic fractions. **Biocycle**, v. 33, p. 58-60, 1992.

KOHYAMA, K.; NISHINARI, K. Cellulose derivatives effects on gelatinization and retrogradation of sweet potato starch. **Journal of Food Science**, v. 57, n. 1, p. 128-131, 1992.

LOBO, A. R.; SILVA, G. M. L. Amido resistente e suas propriedades físico-químicas. **Revista de Nutrição**, Campinas, v. 16, n. 2, abr./jun. 2003.

LUCAS JÚNIOR, J. **Algumas considerações sobre o uso de dejetos de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios**. 1994. 137 f. Tese (Livre-Docência em construções rurais) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1994.

MARTINEZ-GARCIA, G. et al. Two-stage biological treatment of olive Mill wastewater with whey as co-substrate. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 59, n. 4, p. 273-282, jun. 2007.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 1, p. 3-16, ago. 2000.

MATA-ALVAREZ, J. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412-427, 2014.

MEKONNEN, B.; DUGA, J. N.; TADESSE, S. T. Evaluation of Orange fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) varieties for yield contributing parameters in the humid tropics of southwestern Ethiopia. **Journal of Plant Sciences**, v. 10, n. 5, p. 191-199, 2015.

MENDES, B. A. **Obtenção, caracterização e utilização de puba como matéria-prima na produção de etanol**. 1992. 176 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

MENEZES, T. J. B. **Etanol, o combustível do Brasil**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Nota técnica DEA 15/14: inventário energético de resíduos rurais**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, EPE, 2014.

MOLINUEVO-SALCES, B. et al. Anaerobic co-digestion of livestock wastes with vegetable processing wastes: a statistical analysis. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 24, p. 9479-9485, dez. 2010.

MOURA, J. P. **Estudo de casos das rotas tecnológicas para produção de biogás e da influência da composição química de dejetos de matrizes suínas na qualidade do biogás gerada por biodigestor**. 2012. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

NAJAFPOUR, G. et al. High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. **Process Biochemistry**, v. 41, n. 2, p. 370-379, fev. 2006.

NESHAT, S. A. et al. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 79, p. 308-322, 2017.

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. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 600-607, jul./ago. 2010.

OTOO, J. A.; MISSAH, A.; CARSON, A. G. Evaluation of sweet potato for early maturity across different agro-ecological zones in Ghana. **African Crop Science Journal**, Toronto, v. 9, n. 1, p. 25-31, mar. 2001. Disponível em: <<https://tspace.library.utoronto.ca/html/1807/20254/cs01031.html>>. Acesso em: 25 jun. 2018.

PANICHNUMSIN, P. et al. Anaerobic co-digestion of cassava pulp and pig manure: effects of waste ratio and inoculum substrate ratio. In: THE 2<sup>ND</sup> JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON “SUSTAINABLE ENERGY AND ENVIRONMENT (SEE 2006)”, 2., 2006. **Technology and Policy Innovations**, Bangkok: 21-23 nov. 2006. p. 932-937.

PANICHNUMSIN, P. et al. Enhanced biomethanation in co-digestion of cassava pulp and pig manure using a two-phase anaerobic system. **Journal of Sustainable Energy & Environment**, v. 3, n. 2, p. 73-79, 2012.

PANICHNUMSIN, P. et al. Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 8, p. 1117-1124, ago. 2010.

PARAWIRA, W. Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 32, n. 2, p. 172-186, 2012.

PARIKKA, M. Global biomass fuel resources. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 6, p. 613, 620, dez. 2004.

PERDOMO, C. C.; OLIVEIRA, P. A. V.; KUNZ, A. **Metodologia sugerida para estimar o volume e a carga de poluentes gerados em uma granja de suínos**. Concórdia: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2003. 6 p. (Comunicado Técnico 332).

PETERS, D.; TINH, N. T.; THACH, P. N. Sweet potato root silage for efficient and labor saving pig raising in Vietnam. **AGGRIPA**, Rome, 2002. Disponível em: <[http://www.fao.org/docrep/article/agrippa/554\\_en.htm](http://www.fao.org/docrep/article/agrippa/554_en.htm)>. Acesso em: 20 mai. 2018.

PONSÁ, S.; GEA, T.; SÁNCHEZ, A. Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates. **Biosystems Engineering**, v. 108, n. 4, p. 352-360, abr. 2011.

PONTES, P. P. **Reatores UASB aplicados ao tratamento combinado de esgotos sanitários e lodo excedente de filtro biológico percolador**. 2003. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

RESCHSTEINER, M. S. **Produção, digestibilidade e amido resistente em biscoitos extrusados a partir de farinha e fécula de batata doce e mandioca**. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

RIAÑO, B.; MOLINUEVO, B.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. C. Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine manure with winery wastewater. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 5, p. 4131-4136, mar. 2011.

SALMINEN, E.; RINTALA, J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 13-26, mai. 2002.

SCHWENGBER, D. R. **Mandioca a raiz do Brasil**. EMBRAPA/CPAFRR. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/artigos/artigo.php?id=302>>. Acesso em: 11 mar. 2009.

SIEVERS, D. M.; BRUNE, D. E. Carbon/nitrogen ratio and anaerobic digestion of swine waste. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, v. 21, n. 3, p. 537-541, 1978.

SILVEIRA, M. A. **Batata doce: bioenergia na agricultura familiar**. 2008. Acesso em: 03 jul. 2018. Disponível em: <[http://www.abhorticultura.com.br/eventosx/trabalhos/ev\\_1/PAL11.pdf](http://www.abhorticultura.com.br/eventosx/trabalhos/ev_1/PAL11.pdf)>.

SILVEIRA, M. A. Batata-doce: uma nova alternativa para a produção de etanol. In: **Álcool combustível**. Instituto Euvaldo Lodi: Brasília, 15 p. 2008.

SOARES, I. M. et al. Conteúdo fenólico e atividade antioxidante de diferentes cultivares de *Ipomoea batatas* (L.) Lam. obtidas por melhoramento genético para produção industrial de etanol. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada**, v. 35, p. 479-488, 2014.

SOUZA, C. F. et al. Produção volumétrica de metano – dejetos de suínos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 219-224, jan/fev. 2008.

STEINMETZ, R. L. R. et al. Study of metal distribution in raw and screened swine manure. **Clean Journal**, Weinheim, v. 37, n. 3, p. 239-244, 2009.

SUN, L. et al. Characterization of microbial community structure during continuous anaerobic digestion of straw and cow manure. **Microbial Biotechnology**, v. 8, n. 5, p. 815-827, set. 2015.

UDA, C. F. et al. Extração e caracterização do grão de amido de batata, batata-doce e mandioca. **Revista Uningá**, v. 17, n. 1, 2008.

WANG, X. et al. Effects of temperature and carbon-nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: focusing on ammonia inhibition. **Plos One**, v. 9, n. 5, mai. 2014.

WANG, X. et al. Evaluation of two statistical methods for optimizing the feeding composition in anaerobic co-digestion: mixture design and central composite design. **Bioresource Technology**, v. 131, p. 172-178, mar. 2013.

WANG, X. et al. Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. **Bioresource Technology**, v. 120, p. 78-83, 2012.

WARD, A. J., et al. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 7928-7940, nov. 2008.

WU, X. et al. Biogas and CH<sub>4</sub> productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 4042-4047, 2010.

YU, Z.; SCHANBACHER, F. L. Production of methane biogas as fuel through anaerobic digestion. In: SINGH, O.; HARVEY, S. (Ed.). **Sustainable Biotechnology**. Dordrecht: Springer, 2010, p. 105-127.

ZHANG, T. et al. Biogas production by co-digestion of goat manure with three crop residues. **Plos One**, v. 8, n. 6, 25 jun. 2013.

ZHANG, T. et al. Influence of initial pH on thermophilic anaerobic co-digestion of swine manure and maize stalk. **Waste management**, v. 35, p. 119-126, jan. 2015.

ZHOU, J. et al. Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure. **Bioresource Technology**, v. 217, p. 44-49, out. 2016.

**CAPÍTULO 2. Co-digestão anaeróbia dos dejetos de suínos com batata doce ou  
mandioca em diferentes relações C/N**

**Anaerobic co-digestion of swine waste with sweet potato or cassava in different C/N  
ratios**

**Capítulo redigido segundo as normas da Revista Ciência Rural**





## RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a melhor condição de co-digestão anaeróbia de dejetos de suínos (DS), batata doce (BD) e mandioca (M) em biodigestores modelo batelada e de alimentação semi-contínua (segunda etapa), para estabelecer as melhores relações C/N para esses substratos. Foram utilizados biodigestores modelo batelada para a avaliação das produções específicas de biogás durante o processo de biodigestão em diferentes relações C/N (10/1; 13/1; 17/1; 22/1), conduzido em delineamento inteiramente casualizado, composto por um tratamento controle contendo apenas DS, quatro tratamentos com adição de BD e quatro tratamentos com adição de M, todos com quatro repetições. Foram mensuradas para a avaliação dos resultados: as reduções de ST e SV e as produções específicas de biogás. Os tratamentos BD 10/1; 13/1; 17/1; 22/1 e M 10/1 obtiveram as maiores reduções de ST e para as reduções de SV, os tratamentos Controle, BD 10/1 e M 10/1. As maiores produções específicas de biogás por ST adicionados (286 e 270 L kg<sup>-1</sup>) foram obtidas por BD10/1 e M10/1 e para SV adicionados (331, 323, 304 e 301 L kg<sup>-1</sup>) para BD10/1, M10/1, Controle e BD 13/1 respectivamente. Dentre os parâmetros estudados os tratamentos BD 10/1 e M 10/1 apresentaram os melhores resultados e conseqüentemente foram selecionados para compor a segunda etapa. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (controle, BD 10/1 e M 10/1) e cinco repetições. A eficiência dos tratamentos foi avaliada por meio da redução dos constituintes ST e SV e produções específicas de biogás, assim como sua composição (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>), alcalinidade e acidez volátil. O tratamento controle diferiu dos demais (P<0,05) e apresentou menor desempenho. Os tratamentos em co-digestão não diferiram entre si (P<0,05) para o rendimento de biogás (0,968 e 0,948 L g<sup>-1</sup> SV<sub>adic</sub>), metano (0,633 e 0,586 L g<sup>-1</sup> SV) e reduções de ST (75,7 e 76,0%) e SV (85,7 e 85,7%) para os tratamentos BD e M respectivamente. Dessa forma a co-digestão do DS com BD ou M, em biodigestores de alimentação semi-contínua, além de promover um aumento na produção de biogás, proporcionou uma melhor qualidade deste, acrescentando o teor de CH<sub>4</sub>.

**PALAVRAS-CHAVE:** acidificação, carboidratos, metano, potencial energético, tuberosas.

## ABSTRACT

This work was carried out with the objective of evaluating the best anaerobic co-digestion condition of swine waste (SW), sweet potato (SP) and cassava (C) in biodigestors batch model and semi-continuous feed (second stage) to establish the best C/N ratios for these substrates. A batch model was used to evaluate the specific biogas production during the biodigestion process in different C/N ratios (10/1, 13/1, 17/1, 22/1), conducted in a completely randomized design, a control treatment containing only SW, four treatments with addition of SP and four treatments with addition of C, all with four replicates. The reductions of TS and VS and specific biogas productions were measured for the evaluation of the results. The treatments SP 10/1; 13/1; 17/1; 22/1 and C 10/1 obtained the highest TS reductions and for VS reductions, Control, SP 10/1 and C 10/1 treatments were higher. The highest specific biogas productions by TS added (286 and 270 L kg<sup>-1</sup>) were obtained by SP10 / 1 and C10 / 1 and for added VS (331, 323, 304 and 301 L kg<sup>-1</sup>) for SP10 / 1, C10 / 1, Control and SP 13/1 respectively. Among the studied parameters the treatments SP 10/1 and C 10/1 presented the best results and consequently were selected to compose the second stage. A completely randomized design with three treatments (control, SP 10/1 and C 10/1) and five replications were used. The efficiency of the treatments was evaluated by means of the reduction of constituents TS and VS and specific productions of biogas, as well as their composition (CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>), alkalinity and volatile acidity. The control treatment differed from the others (P <0.05) and presented lower performance. Co-digestion treatments did not differ (P > 0.05) for the biogas yield (0.968 and 0.948 L g<sup>-1</sup> VS<sub>adic</sub>), methane (0.633 and 0.586 L g<sup>-1</sup> VS) and TS reductions (75.7 and 76.0%) and VS (85.7 and 85.7%) for the SP and C treatments respectively. Thus, the co-digestion of SW with SP or C, in semi-continuous feed biodigesters, in addition to promoting an increase in biogas production, provided a better quality of this, adding the content of CH<sub>4</sub>.

**KEYWORDS:** acidification, carbohydrates, energy potential, methane, tuberoses.

## 2.1. INTRODUÇÃO

A co-digestão anaeróbia traz benefícios quando comparada com a digestão isolada dos resíduos, que pode apresentar limitações como alta carga orgânica ou elevadas concentrações de nitrogênio (MATA-ALVAREZ et al., 2014), além de diminuir possíveis compostos tóxicos, equilibrar o pH, os micro e macro nutrientes e equilibrar a relação entre o carbono e o nitrogênio (C/N).

A relação C/N ótima parece ser o efeito sinérgico mais interessante quando diferentes substratos são co-digeridos e, portanto, este aspecto tem sido amplamente estudado (ESPOSITO et al., 2012).

O dejetto de suíno é um dos substratos mais estudados na digestão anaeróbia e também como co-substrato, sendo adequado para comparações de rendimento de biogás e CH<sub>4</sub>. Segundo os autores MOLINUEVO-SALCES et al. (2012) e MATA-ALVAREZ et al. (2014), o dejetto de suíno possui alta capacidade de tamponamento, alta biodegradabilidade e concentração de amônia, fatores que otimizam muito o processo. Porém essa alta concentração de amônia associada a altas concentrações de sólidos podem estar acima da capacidade suporte dos microrganismos, diminuindo o crescimento dos mesmos (ASTALS et al., 2012; WANG et al., 2012).

A relação C/N do dejetto de suíno pode variar de 6 a 8 de acordo com a fase de crescimento do animal (LORIMOR et al., 2000). Com base em seus constituintes, o dejetto de suínos é melhor co-digerido com fontes que possuam elevado teor de carbono, a fim de proporcionar melhor relação C/N ao sistema (MATA-ALVAREZ et al., 2000; MOLINUEVO-SALCES et al., 2010).

A batata doce e a mandioca possuem amido como seu principal carboidrato. LE e STUKEY (2017) citam que esses materiais orgânicos são considerados a fonte primária de energia para os microrganismos visto que possuem rápida degradabilidade.

Com propriedades desejáveis a batata doce (*Ipomoea batatas* L. (Lam.) e a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) são culturas que apresentam potencial para geração de bioenergias (SILVEIRA, 2008; OKUDOH et al., 2014). A batata doce é rica em amido e açúcares fermentáveis, como frutose, glicose e sacarose e possui baixo teor de fibras e proteínas (RAHMAN et al., 2015).

Materiais vegetais são indicados para a associação com dejetos animais no processo de co-digestão (AWAIS et al., 2016; HASSAN et al., 2017), visto que ao equilibrarem a relação C/N no meio podem melhorar a eficiência do processo de biodigestão.

A composição dos materiais utilizados na co-digestão, bem como a disponibilidade da fração de carbono desses co-produtos influenciam diretamente no valor ideal da relação C/N a ser aplicada no processo. Materiais com a fração de carbono (C) disponível para a biodigestão incrementam energia ao processo e frações de carbono não disponíveis como é o exemplo da lignina que, além de não doarem energia ao processo, tornam o mesmo mais lento.

PANICHNUMSIN et al. (2010) encontraram o melhor rendimento de 33/1 na codigestão de dejetos de suíno e polpa de mandioca que é um subproduto da extração de amido da mandioca e possui menor quantidade de carboidratos disponíveis e maior quantidade de fibra quando comparado com a mandioca *in natura*.

WU et al. (2010) relataram o melhor resultado de relação C/N de 20/1 para a co-digestão de dejetos de suíno e palhas de cereais, que possuem alta concentração de lignina. ABOUDI et al. (2015) encontraram os melhores rendimentos de metano para a co-digestão de *Cossettes* de beterraba e dejetos de suíno para a relação C/N de 18/1.

A adição de tubérculos ricos em fontes de carbono de fácil degradação ao dejetos de suíno em uma correta relação C/N pode proporcionar uma melhor condição ao processo de biodigestão anaeróbia com maiores produções de biogás e melhores concentrações de metano, quando comparado com a digestão isolada dos dejetos.

Deste modo, objetivou-se encontrar qual relação C/N traria maiores rendimentos de biogás, metano e redução de constituintes sólidos em biodigestores modelo batelada e de alimentação semi-contínua na co-digestão de dejetos de suíno com batata doce ou mandioca.

## 2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Biomassa I e Biodigestão Anaeróbia do Departamento de Engenharia Rural, utilizando-se os dejetos gerados no Setor de Suinocultura, ambos situados na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/ UNESP - Câmpus de Jaboticabal, cujas coordenadas geográficas são: 21° 14'05" S; 48° 17'09" W e altitude média de 613,68 metros.

O trabalho foi realizado em duas etapas, na primeira foram avaliadas diferentes relações C/N nos substratos preparados para a biodigestão anaeróbia, utilizando-se dejetos suínos e diferentes inclusões de batata doce (BD) e mandioca (M), em biodigestores modelo batelada. Para a condução da segunda etapa, foram selecionados os substratos que apresentaram os melhores resultados para todos os parâmetros estudados na etapa 1, e então realizada a co-digestão destes resíduos, em biodigestores de alimentação semi-contínua.

Anteriormente ao ensaio preliminar foram realizadas análises para a caracterização quantitativa dos substratos determinando-se: teores de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), matéria mineral (MM), carbono (C) e nitrogênio (N) do dejetos de suíno (DS), da BD e da M, com a finalidade de se verificar, com base nos ST, as quantidades de inclusão de cada substrato no abastecimento dos biodigestores.

Utilizou-se DS *in natura*, de animais em fase de terminação que eram alimentados com dietas formuladas a base de milho. Para o ensaio utilizando biodigestores modelo batelada efetuou-se uma coleta única no início do experimento e para a biodigestão de alimentação semi-contínua isso ocorreu diariamente. As coletas foram realizadas por meio de raspagem das baias

dos alojamentos dos animais sem utilização de água. A BD e a M foram adquiridas, semanalmente, em varejo local provenientes da agricultura familiar do Assentamento de Córrego Rico. Todos os materiais foram armazenados sob refrigeração a 6°C.

### **2.2.1 Ensaio preliminar – Biodigestores modelo batelada**

O período de execução do ensaio preliminar foi compreendido pelo intervalo de 90 dias. Os biodigestores foram armazenados em galpão coberto, abrigados do sol e chuvas, possibilitando-se maior controle da variação térmica.

No ensaio preliminar foram utilizados biodigestores modelo batelada de bancada abastecidos com DS e diferentes proporções de BD e M no intuito de testar a relação de C/N na mistura em co-digestão que resultasse em maiores incrementos na produção de biogás. As relações C/N avaliadas nesse estudo foram de 10, 13, 17 e 22/1 para tratamentos com inclusão de BD e M ao DS.

Adotou-se delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 9 tratamentos e 4 repetições (Tabela 2), sendo eles Controle, BD10/1, BD 13/1, BD 17/1, BD 22/1, M 10/1, M 13/1, M 17/1 e M 22/1. Foram utilizados 36 biodigestores, dispostos de forma casualizada sobre uma bancada.

As quantidades de inclusão de cada substrato foram determinadas em função das quantidades de ST, C e N contidas no DS, na BD e na M, conforme os resultados obtidos nas análises de caracterização dos componentes dos substratos (Tabela 1).

Foi adicionado 15% do volume total de abastecimento (270 ml) de inóculo de cama de frango (0,45% de ST que não foram considerados nos cálculos das cargas), como mecanismo para acelerar o processo. As cargas foram ajustadas para o volume de 1,8 L, e teor de 4% de ST, variando a proporção de DS, BD e M adicionados para o ajuste da relação C/N em cada tratamento (Tabela 2).

Os biodigestores utilizados consistiam em modelo batelada de bancada (um único abastecimento), caracterizados por três cilindros retos de PVC com diâmetros de 50, 100 e 150 mm. O cilindro de 50 mm consiste no local onde os substratos permaneciam armazenados e possui capacidade total para 2 L, encontrando-se acoplado no interior do cilindro de 150 mm, ambos fixados em um CAP de PVC, deixando-se um espaço entre a parede externa do cilindro interior e a externa do cilindro exterior que abrigava um volume de água (selo d'água). O cilindro de 100 mm era vedado na extremidade superior por CAP e permanecia emborcado sobre o espaço gerado entre o cilindro maior e menor, formando desta maneira uma condição anaeróbia para o processo de fermentação e possibilitando o armazenamento do biogás produzido.

O preparo da carga foi realizado da seguinte forma: trituraram-se separadamente a BD e a M com casca até que estas virassem uma pasta. A partir disso, pesaram-se as quantidades de água, inóculo, DS e BD ou M para cada tratamento.

A mistura de composição dos substratos foi batida em liquidificador industrial por 1 minuto. Depois de abastecer todos os biodigestores, foram introduzidos os gasômetros. O horário, temperatura (°C) e deslocamento vertical dos gasômetros, foram medidos de acordo com a produção para compor o volume total de biogás produzido em cada repetição. No abastecimento (afluentes) e desabastecimento (efluentes) realizaram-se análises de ST, SV, pH e avaliadas as produções totais e específicas de biogás segundo as quantidades de ST e SV adicionados.

### **2.2.2 Ensaio de co-digestão – Biodigestão de abastecimento semi-contínuo**

O segundo ensaio foi conduzido em biodigestores de alimentação semi-contínua (abastecimento diário), utilizando as proporções de inclusão dos substratos que apresentaram as maiores produções de biogás na etapa anterior, a fim de se obter resultados em melhores condições na proporção DS-BD ou DS-M, sendo eles BD 10/1 e M 10/1. As proporções

utilizadas nas misturas foram determinadas com base nas análises de caracterização dos substratos, conforme a Tabela 3.

Adotou-se um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 3 tratamentos (controle, BD 10/1 e M 10/1) e 5 repetições, totalizando 15 biodigestores de alimentação semi-contínua. As proporções utilizadas nas misturas foram calculadas com base na quantidade de ST (2%) e na relação C/N (10/1) que apresentou melhor resultado no primeiro experimento, conforme a Tabela 4. O volume da carga diária (2L), foi calculado em função de tempo de retenção hidráulica (TRH) de 30 dias.

Os biodigestores foram armazenados em galpão coberto, abrigados de sol e chuvas, possibilitando-se maior controle da variação térmica. O período de execução do experimento foi de 17 de abril a 4 de junho de 2017. Totalizando 49 dias.

Os biodigestores de alimentação semi-continua eram constituídos de duas partes distintas; o recipiente com o material em fermentação e o gasômetro. O recipiente com o material em fermentação era um cilindro reto de PVC com diâmetro de 300 mm, com 1 m de comprimento e capacidade útil para 60 L, tendo as extremidades vedadas por dois CAP's de PVC com 300 mm de diâmetro. Em um CAP está fixado o tubo com 75 mm de diâmetro, por onde se realizaram os abastecimentos diários e na outra, um tubo de igual diâmetro destinado à saída do biofertilizante e também um registro para a saída do biogás.

O gasômetro era constituído por dois cilindros retos de PVC de 250 e 300 mm de diâmetro, sendo que o segundo estava fixado em um CAP de PVC de 300 mm de diâmetro (na base), podendo assim receber o cilindro de 250 mm em seu interior de tal maneira que o espaço existente entre eles comporte um volume de água ("selo de água"), possibilitando assim o armazenamento do biogás produzido já que a extremidade superior deste estava vedada por CAP com 250 mm de diâmetro.



As cargas eram preparadas diariamente, os tubérculos foram triturados até que virassem uma pasta. Para todas as repetições de cada tratamento pesava-se a água, BD, M e DS e misturava-se em liquidificador industrial por aproximadamente um minuto para então abastecer os biodigestores. Diariamente realizavam-se as cargas (afluentes) e a mesma quantidade de biofertilizante (efluente) era retirada, media-se os volumes de biogás produzido pelo deslocamento vertical do gasômetro e a temperatura (°C) ambiente. Durante todo o processo foram colhidas, de cada biodigestor, amostras dos afluentes e efluentes para análises de ST, SV e pH, Acidez Volátil, Alcalinidade, C e N.

Foram avaliadas as produções totais e específicas de biogás e metano (CH<sub>4</sub>) segundo as quantidades de ST e SV adicionados e reduzidos, C, N, alcalinidade, acidez volátil e pH.

### 2.2.3 Metodologias Aplicadas

A determinação das quantidades de inclusão de cada substrato aos tratamentos foi mensurada com base na equação 2, proposta por TRAUTMANN & KRASNY (1997).

$$W_2 = \frac{(W_1 \cdot N_1) \cdot \left( R - \left( \frac{C_1}{N_1} \right) \right) \cdot (100 - M_1)}{N_2 \cdot \left( \left( \frac{C_2}{N_2} \right) - R \right) \cdot (100 - M_2)} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde  $W_2$  é a massa (kg) do tubérculo a ser utilizado para balancear uma massa desejada de dejetos em termos de relação C/N;  $W_1$  é a massa total conhecida do DS utilizado na co-digestão;  $N_1$  é o conteúdo (%) de nitrogênio do DS;  $R$  é a relação C/N necessária à co-digestão;  $C_1$  é o conteúdo (%) de C do DS;  $M_1$  é a umidade (%) do DS em co-digestão;  $N_2$  é o conteúdo (%) de nitrogênio do tubérculo;  $C_2$  é o conteúdo (%) de carbono do tubérculo; e  $M_2$  é a umidade (%) do tubérculo.

O volume de biogás produzido foi mensurado pela medição do deslocamento vertical dos gasômetros por uma régua graduada, multiplicando o dado registrado pela área da seção transversal dos gasômetros, 0,00785 m<sup>2</sup> para os biodigestores modelo batelada e 0,04909 m<sup>2</sup> para os biodigestores de alimentação semi-contínua. O trabalho de CAETANO (1985) foi utilizado como base na correção do volume de biogás para as condições de 1 atm e 20°C. A qualidade do biogás foi analisada semanalmente em cromatógrafo BID-2010 Plus para determinação dos teores de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

A determinação dos teores de ST, SV, pH e o parâmetro de alcalinidade total, foi obtido segundo metodologias descritas por APHA (2005). A acidez volátil foi determinada por titulometria, conforme descrito por DILALLO & ALBERTSON (1961).

As produções específicas de biogás foram calculadas considerando-se as produções totais em função das quantidades de ST e SV adicionados nos biodigestores.

O teor de carbono total e de nitrogênio foram mensurados utilizando-se o analisador elementar LECO modelo TruSpec CN628 (LECO INSTRUMENTS, ST JOSEPH, MICHIGAN, USA).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e a comparação das médias foi realizada pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Foi utilizado o programa computacional SISVAR 5.6 para as análises estatísticas (FERREIRA, 2014).

## **2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **2.3.1. Ensaio preliminar – Biodigestores modelo batelada**

Os valores de pH no afluente, sugerem que as adições das fontes de carbono não alteraram o meio, mantendo o pH em uma faixa (6,9 a 7,3) ideal para um bom andamento do

processo de biodigestão. CAMPOS et al. (2006) citam que a faixa ideal para o pH no afluente de substratos em biodigestão é entre 6,5 e 7,5.

Ao final do processo de biodigestão anaeróbia os potenciais hidrogeniônicos (pH) dos substratos relativos aos tratamentos BD 22/1, M 13/1, M 17/1 e M 22/1 apresentaram valores abaixo de 6,0 (Figura 1), indicando que possivelmente houve acúmulo de ácidos no meio durante o processo de digestão, provavelmente gerados pelo excesso de carboidratos de fácil degradação disponíveis no meio.

Os substratos que receberam M como fonte de carbono acidificaram com inclusões menores do que as inclusões de BD, isso provavelmente possui relação com a composição da M e também pela concentração de ácido cianídrico no material. O ácido cianídrico torna o ambiente no interior do biodigestor ácido, o que inibe a atividade dos microrganismos (ADELEKAN; BAMGBOYE, 2009).

Considerando que valores de pH inferiores a 6,2, inibem consideravelmente a atividade metanogênica (BORJA, 2011), infere-se que esta queda do pH afetou negativamente as produções de biogás.

A inclusão de BD aos substratos em digestão não afetou as reduções (Tabelas 5) de ST ( $P > 0,05$ ), que foram semelhantes ao controle (44,47 %). Esses resultados indicam que a adição de BD e aumento da relação C/N não prejudicaram remoção dos ST do substrato quando comparados com o DS isolado.

Os valores de reduções de ST para os tratamentos BD 10/1, BD 13/1, BD 17/1 e BD 22/1 foram 47,54; 45,78; 44,67 e 42,38 respectivamente e foram similares e maiores aos encontrados por DAMACENO (2018) que ao avaliar sobre a inclusão de batata doce ao lodo de aviário, em biodigestores modelo batelada e com TRH de 145 dias, obteve resultados que variaram de 48,7 a 26% para inclusão de 20 a 60% de batata doce ao lodo, observando que conforme se aumentou a concentração de carbono ao meio, houve diminuição das reduções de

ST . As inclusões de BD ao DS nesse estudo variaram de 13 a 70% da massa total adicionada aos biodigestores.

No entanto, para os substratos que receberam a M como componente, a maior redução de ST ( $P < 0,05$ ) foi de 45,04% (Tabela 5) e ocorreu na relação C/N de 10/1, que não diferiu das diferentes relações C/N para a BD e o controle. Esses resultados provavelmente possuem relação com o pH e a concentração de ácido cianídrico, onde a inclusão de M aos substratos em relações acima 10/1 tornou meio ácido, inibindo a atividade dos microrganismos decompositores da matéria orgânica.

As reduções de ST para substratos preparados com M em relações C/N de 13:1 ou maiores foram semelhantes ( $P > 0,05$ ) e apresentaram valor médio de 33,07%. Estas reduções, apesar de menores em relação as demais ( $P < 0,05$ ), podem ser consideradas elevadas se observadas as produções de biogás (valores inferiores a 3,5 litros) durante o processo de digestão, já que os sólidos somente serão removidos do meio devido a formação de biogás. Acredita-se que estes valores de reduções estejam superestimados, já que foi verificada dificuldade de amostragem dos ST nos afluentes, sobretudo dos substratos que continham maior proporção de inclusão da M, devido a presença de fibras mais longas, fato que pode ter acrescido a concentração dos ST dos afluentes, aumentando assim a quantidade de ST colocada em digestão.

Os maiores valores de reduções ( $P < 0,05$ ) de SV foram apresentadas na Tabela 5 e são referentes aos tratamentos BD 10/1, BD 13/1, BD 17/1 e M 10/1, que foram 57,34; 55,46; 52,06 e 56,28 % respectivamente, indicando que essas relações melhoraram a degradação dos constituintes orgânicos no substrato, possivelmente por uma maior estabilização do processo e adaptação dos microrganismos anaeróbios. Os melhores resultados de redução possivelmente se relacionam com uma maior produção de biogás.

Os tratamentos com inclusão de M em relações C/N acima de 13/1 e BD na relação 22/1 obtiveram os menores valores ( $P < 0,05$ ) de redução de SV. Essas reduções podem ter relação com pH do efluente desses tratamentos, em que a acidez inviabiliza a atividade dos microrganismos que consomem a matéria orgânica para a produção de biogás.

Houve efeito significativo ( $P < 0,05$ ) de produção de biogás quando as médias de produção dos tratamentos foram comparadas entre si (Figura 2).

Para a inclusão das diferentes fontes botânicas a relação C/N que obteve melhor resultado quanto a produção de biogás foi a 10/1. Essa relação C/N é menor que a recomendada na literatura, indicando que a relação entre o carbono e o nitrogênio em uma mistura em co-digestão possivelmente não é o único parâmetro de um bom processo de degradação e que a disponibilidade dos mesmos deve ser levada em consideração, além de outros indicativos como pH e quantidade de outros nutrientes. Materiais com a fração de carbono mais disponível e de fácil degradação, como são as encontradas na BD e M são rapidamente metabolizados pelos microrganismos gerando maior incremento na produção de biogás. O aumento da relação C/N potencializou a produção de biogás em 22,7; 7,21 e 14,75 % para os tratamentos BD 10/1, BD 13/1 e M 10/1, respectivamente, em relação ao tratamento controle, resultando nas produções totais de 19,2, 16,8 e 18,0 L, respectivamente (Figura 3).

Os tratamentos BD 22/1, M 13/1, M 17/1 e M 22/1 ficaram com as menores produções ( $P < 0,05$ ) de biogás, produzindo menos que o tratamento sem ajuste na relação C/N. Esses valores foram 5,89; 3,44; 2,23 e 1,84 L (Figura 3).

Ainda que se tenha obtido a mesma relação C/N para a ambas as adições de batata doce e mandioca, há de se ressaltar que essas raízes possuem particularidades de características a serem levadas em consideração quando observa-se a variação de pH e a produção de biogás obtida a partir deste ensaio.

A mandioca e a batata doce possuem alta disponibilidade das fontes de carbono e assim alta biodegradabilidade desses carboidratos que são hidrolisados muito rapidamente. Neste primeiro estágio da decomposição, substratos como os carboidratos, muito presentes nas raízes, são transformados em açúcares e AGVs. O acúmulo de AGVs pode inibir a produção de biogás (GÖBLÖS et al., 2008).

Constatou-se que a medida que se aumentava a concentração de M, acima da relação C/N 10/1, o pH do efluente dos reatores e a produção total de biogás decresceu, obtendo apenas o tratamento M 10/1 uma boa média de produção.

Resultados similares foram evidenciados por ADELEKAN & BAMGBOYE (2009) ao avaliarem em biodigestores modelo batelada a co-digestão de diferentes resíduos (bovinos, suínos e aves) com diferentes proporções de inclusão de cascas de mandioca, as proporções de casca:resíduos foram: 1:1; 2:1; 3:1; 4:1 (testando todos os resíduos). Os autores concluíram que conforme se aumentou a inclusão das cascas aos resíduos houve redução na produção de biogás, e atribuíram este comportamento a composição lignocelulósica da casca da mandioca e também a presença de ácido cianídrico, que torna o meio mais ácido.

Segundo PANICHNUMSIN et al. (2010) a composição dos substratos afeta a estabilidade do processo de digestão, sendo a polpa de mandioca considerada um substrato pobre em termos de oferta de nutrientes e capacidade de tamponamento. Associando em seu trabalho que a alta proporção de inclusão de polpa de mandioca, que possuem carboidratos de rápida degradação, na matéria-prima pode ter levado a uma alta formação de AGVs e uma falha do processo de co-digestão.

A polpa de mandioca é um subproduto da extração de amido possuindo assim características um pouco diferentes da mandioca *in natura*, que foi a forma utilizada nesse trabalho. No entanto, mesmo a mandioca *in natura* possuindo teores de amido maiores que a encontrada na polpa, em torno de 66% a mais, também se caracteriza por altas concentrações

de carboidratos de rápida degradação e pobreza de nutrientes. Podendo ter levado a uma maior produção de AGVs logo no início da biodigestão e instabilidade do processo.

Nos tratamentos com adição de batata doce a acidificação do meio (pH de 5,29) ocorreu apenas para a inclusão mais alta de carbono. Inferindo que as características das fontes botânicas utilizadas nesse trabalho possuem diferenças em sua composição que podem ter interferido nesses resultados. As duas raízes possuem alto teor de amido, porém a mandioca possui em média 7% a mais que a batata doce (KOHYAMA; NISHINARI, 1992).

Considerando que as raízes e todo o substrato foram triturados, houve assim uma maior facilidade por parte dos microrganismos em processar o material. ESPOSITO (2012) mencionou que a hidrólise de diferentes substratos é influenciada pelo nível de carbono disponível para a produção de biogás, assim como o tamanho de partículas e proporção de nutrientes. Considerando que a concentração de amido na mandioca é maior e que a BD possui uma maior quantidade de amido resistente, pode se inferir que a quantidade de energia disponibilizada pela M logo no início do processo foi maior, gerando maior concentração de AGV's que inibiram a produção de biogás.

A concentração de ST adotada para a confecção dos substratos, associada a composição da BD e M podem ter resultado em maior carga orgânica, principalmente nas maiores relações C/N, e assim ter disponibilizado elevada quantidade de energia aos microrganismos, gerando concentrações de AGV's superiores as suportadas pelo meio. RIPLEY et al. (1986) cita que a elevada concentração de matéria orgânica no afluente gera uma rápida fermentação dos compostos solúveis e elevada produção de ácidos, levando a uma queda no pH.

Os tratamentos BD 10/1 e M 10/1 alcançaram as maiores produções específicas de biogás por quantidade de ST adicionados indicando que a adição de fontes de carbono nessa

relação C/N foi benéfica. Para as produções específicas por SV adicionados, os tratamentos: controle, BD 10/1, BD 13/1 e M 10/1 apresentaram os melhores rendimentos.

As produções específicas de biogás com as inclusões de mandioca nas relações C/N 13, 17 e 22/1 apresentaram os menores valores 54, 35 e 29 L Kg<sup>-1</sup> ST respectivamente (P<0,05), no entanto para a BD, o menor valor, de 94 L Kg<sup>-1</sup> ST ocorreu somente na relação C/N de 22/1 (Tabela 6). Esses resultados se relacionam com as características dos materiais, disponibilidade das fontes de carbono, inclusões de cada um e o pH no efluente de cada tratamento.

A batata doce e a mandioca possuem amido como seu principal carboidrato. LE e STUKEY (2017) citam que esses materiais orgânicos são considerados a fonte primária de energia para os microrganismos visto que possuem rápida degradabilidade. A rápida degradação desse material orgânico pode levar ao acúmulo de AGV's no meio e inibir o processo. Já materiais ricos em lignina possuem uma degradação lenta podendo levar a um menor rendimento de biogás (SUN et al., 2015; LE; STUCKEY, 2017).

Esses resultados se assemelham aos encontrados por ADELEKAN & BAMGBOYE (2009), que analisando a co-digestão de diferentes resíduos (aves, suínos e bovinos) com cascas de mandioca obtiveram baixas produções, obtendo um rendimento de 35 L Kg<sup>-1</sup> de ST adicionados ao trabalhar com a mesma concentração de cascas e resíduos de pocilga (1:1). Os autores ainda concluíram que conforme se aumentou a inclusão de cascas aos resíduos de pocilga (2:1; 3:1 e 4:1) as produções por ST adicionadas diminuíram (26,5, 17,1 e 9,3 L kg<sup>-1</sup> SV)

Para um rendimento de produção de 35 L kg<sup>-1</sup> de ST adicionados, o presente estudo usou mandioca *in natura*, que possui maior relação C/N quando comparada com a casca (73,25 e 48,7 respectivamente) e a quantidade de inclusão da raiz ao dejetos foi de 40% dos ST adicionados (M 17/1). Sugerindo que ácido cianídrico e as altas concentrações das fontes de



carbono encontradas na mandioca possivelmente interferiram de forma negativa no meio, prejudicando a produção de biogás.

MIRANDA et al. (2012) analisando a biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos (fase de terminação), alimentados com milho e sorgo, em biodigestores modelo batelada, com temperatura controlada em 35°C e adotando cerca 5,39% de ST, relataram rendimento de biogás de 581 L kg<sup>-1</sup> SV adicionado, para TRH de 47 dias. O valor relatado pelos autores é maior do que o encontrado no presente estudo (304 L kg<sup>-1</sup> SV), com menor teor de ST de entrada (4%).

A temperatura de 35°C utilizada no trabalho pode ter elevado o rendimento de biogás se comparado com o potencial alcançado no presente trabalho, já que a média da temperatura nesse estudo foi de 23,8°C. A temperatura possui grande importância no bom andamento do processo de biodigestão, visto que os microrganismos são sensíveis a mudanças bruscas ( $\pm 2$  ou 3°C) e a faixas de temperatura fora das ideais (25 a 42°C), que podem debilitar o desempenho dos microrganismos metanogênicos, impactando a produção de biogás (KUNZ et al., 2016).

DAMACENO (2018) avaliando a co-digestão de lodo de aviário com batata doce em biodigestores modelo batelada, aproximadamente 4,5% de ST e proporções de batata doce: lodo variando entre 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 e 0:100, relataram que inclusões de batata doce ao lodo em proporções acima de 40% diminuiu a produção específica por SV adicionados, apresentando o tratamento com inclusão de apenas 20% de BD a maior produção específica de biogás por SV adicionados. No presente estudo inclusões acima de 35,5% de BD ao dejetos de suíno (BD 10/1) diminuíram a produção específica por SV adicionados.

Conforme apresentado na Figura 3, observa-se que durante o período analisado (92 dias) houveram variações na produção de biogás entre os tratamentos, sendo o controle o tratamento que primeiro iniciou as produções. Isso possivelmente possui relação com o dejetos de suíno ser um material previamente digerido.

A forma da curva pode demonstrar a reação dos microrganismos a fontes diferentes de carbono, indicando que os co-substratos e as quantidades adicionadas podem demandar mais tempo para serem digeridas em um sistema de carga única. Os resultados demonstram que, supostamente, a quantidade de energia disponibilizada pelas raízes nas relações C/N, BD 22/1 e M 13/1, M 17/1, M 22/1 acidificaram o meio e a capacidade tampão do DS não foi suficiente para voltar o pH aos níveis indicados para o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pelo bom andamento do processo de biodigestão.

Em atenção a partida dos biodigestores, não é indicado adotar a concentração de ST e nem as proporções mencionadas, pois como dito anteriormente corre-se o risco de acidificação pela produção de AGV's. Mostrando que o ideal seria adotar cargas apenas com DS e posteriormente incluir os co-substratos aumentando a relação C/N. DONARCK (2012) cita que a alta concentração de carboidratos de fácil degradação leva a alta formação de AGV's na hidrólise e falência do processo.

A curva para a produção total de biogás em função do tempo do experimento mostra que, provavelmente, a quantidade de energia disponibilizada pelos substratos não pode ser totalmente aproveitada nos 92 dias de experimento. Como esse experimento foi de caráter preliminar, em que o foco do estudo foi obter um resultado primário sobre a degradabilidade e produções específicas dos substratos em co-digestão com o ajuste da relação C/N, após obtidos os resultados o experimento foi interrompido. Possivelmente, se mantidos por um TRH maior, teriam alcançado níveis de produção similares com os comparados encontrados na literatura.

De acordo com os resultados obtidos nesta primeira etapa com os biodigestores modelo batelada, os tratamentos BD 10/1 e M 10/1 apresentaram melhores resultados para todos os parâmetros estudados e foram selecionados para compor a segunda etapa do experimento em biodigestores de alimentação semi-contínua.

### 2.3.2. Biodigestores de alimentação semi-contínua

Os resultados que apresentaram maiores rendimentos de biogás no ensaio preliminar para a adição de cada raiz ao DS foram com a relação C/N de 10/1.

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 7, verifica-se que houve redução dos teores de C para os três tratamentos no efluente em comparação com o afluente. Os teores de C apresentaram reduções de 22,72%, 45,51% e 42,41% para o tratamento controle, BD 10/1 e M 10/1 respectivamente. Esses resultados eram esperados em função da redução dos constituintes de C na forma de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> para a produção de biogás.

Foi observado um decréscimo ( $P < 0,05$ ) nos valores de alcalinidade no afluente e efluente para os tratamentos em co-digestão quando comparados ao tratamento controle (Figura 4). O tratamento M 10/1 obteve a menor alcalinidade na entrada e saída dos biodigestores. A alcalinidade é a capacidade que o meio possui de neutralizar ácidos, quando a alcalinidade é baixa indica que o substrato possui baixo poder tamponante e maior facilidade de acúmulo de AGV's. Para todos os tratamentos estudados, os valores de alcalinidade total estiveram dentro da faixa indicada por METCALF & EDDY (2003), para que o processo de digestão ocorra de forma satisfatória e que varia entre 1000 e 5000 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>. Os valores estiveram próximos e não houve efeito negativo na co-digestão, contudo era esperado que os substratos em co-digestão apresentassem menores valores para alcalinidade, devido à baixa capacidade de tamponamento da BD e da M. PANICHNUMSIN et al. (2012) encontraram valores variando entre 2000 a 5000 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> para a co-digestão de dejetos suíno associado com polpa de mandioca.

No afluente, a acidez volátil (Figura 5), aumentou ( $P < 0,05$ ) a medida que se adicionou fontes de carbono, sendo esses valores considerados altos para um bom andamento do processo de biodigestão, esses valores acompanharam o pH que diminuíram nos tratamentos em co-digestão (6,56; 6,48 e 6,42 para os tratamentos Controle, BD 10/1 e M 10/1 respectivamente).

No efluente os valores de acidez diferiram ( $P < 0,05$ ) entre si, mas todos estiveram baixos, provavelmente pela capacidade tampão do dejetos que conseguiu tamponar os ácidos e manter o processo dentro dos níveis aceitáveis pelos microrganismos. Não havendo comprometimento da produção do biogás.

A estabilidade do processo de biodigestão com base nas análises de acidez volátil e alcalinidade foi um dos benefícios de uma inclusão de fontes de carbono com uma relação C/N abaixo do recomendado pela literatura. Como as fontes de carbono utilizadas nesse estudo possuem alta disponibilidade fração C, a quantidade adicionada não prejudicou a capacidade de tamponamento do dejetos.

Os resultados obtidos para a alcalinidade e acidez volátil indicam que a produção de metano a partir da BD e da M requer uma capacidade de tamponamento para neutralizar o pH quando são produzidos rapidamente os ácidos graxos voláteis (AGVs). O DS por possuir alta capacidade de tamponamento, biodegradabilidade e concentração de amônia (MOLINUEVO-SALCES et al., 2012; MATA-ALVAREZ et al., 2014), otimizou o processo, sendo responsável pela manutenção do pH.

Não houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ) para as reduções dos constituintes sólidos e voláteis entre os tratamentos (Tabela 8). Os valores encontrados para as reduções de ST nos tratamentos controle, BD10/1 e M10/1 foram de 76,76; 75,69 e 76,01% e para SV foram 86,20; 85,72 85,70% respectivamente.

Esses valores indicam que o ajuste da relação C/N de 9/1 para 10/1 não trouxe maiores reduções dos constituintes orgânicos aos substratos em co-digestão. Esses valores não eram esperados, visto que o aumento de fontes de C rapidamente degradáveis, compostos principalmente por amido, deveriam levar a uma maior degradação dos constituintes orgânicos pelo consequente aumento na produção de biogás.

Os resultados de redução encontrados nesse trabalho estão acima dos encontrados na literatura. Quando se trabalha com digestores de carga diária, após a digestão ocorre a sedimentação dos substratos, assim, a carga de saída acaba não refletindo o comportamento de degradação, já que existe esta sedimentação dos constituintes de maior densidade (SCHWINGEL, 2014). Os altos valores de redução alcançados podem ter ocorrido devido a retenção de sólidos no interior dos digestores, sendo talvez esse o motivo de se ter encontrado valores maiores do que os da literatura

PANICHNUMSIN et al. (2010) avaliaram a co-digestão de dejetos de suínos e polpa de mandioca (resíduo, com menor teor de amido quando comparada com a mandioca *in natura*), em biodigestores de alimentação semi-continua, com TRH de 15 dias, temperatura controlada de 37°C, carga orgânica volumétrica (COV) de 3,5 Kg e agitação diária de 15 minutos a cada meia hora. As reduções de ST e SV encontradas no trabalho para a inclusão de 20% de polpa ao dejetos (C/N 17/1) foram de 39 e 49%, respectivamente. O tratamento apenas com dejetos de suínos apresentou reduções de ST e SV de 39 e 46%.

Os valores encontrados para as reduções de ST e SV pelos autores são menores que os encontrados nesse trabalho para o tratamento controle e também para os tratamentos com inclusão de fontes de carbono. Esses menores resultados encontrados pelos autores possuem relação com o sistema de agitação aplicado aos biodigestores, que consegue amostrar o efluente com um real valor de ST e SV degradados.

Quanto aos rendimentos de biogás por ST e SV adicionados (Tabela 9), os tratamentos em co-digestão não apresentaram diferença ( $P > 0,05$ ) entre si, mas demonstraram melhor desempenho quando comparado ao controle. Este comportamento indica que o ajuste da relação C/N no meio em digestão provavelmente proporcionou um meio mais estável ao desenvolvimento dos microrganismos, proporcionando maior produção de biogás.

Houve diferença ( $P < 0,05$ ) entre as produções diárias (Tabela 9) de biogás. O tratamento BD 10/1 apresentou a maior produção de biogás ( $26,1 \text{ L d}^{-1}$ ), seguido de M 10/1 ( $25,71 \text{ L}$ ), sendo estas quantidades maiores que as produzidas pelo tratamento controle. Estes acréscimos representaram 17,5 e 15,8% a mais de biogás, para BD 10/1 e M 10/1, respectivamente, em relação ao tratamento controle. O acréscimo das raízes ao dejetos possivelmente disponibilizou maiores quantidades das fontes de carbono disponíveis no meio, favorecendo assim a produção de biogás.

PANICHNUMSIN et al. (2010) avaliando a co-digestão de dejetos de suínos e polpa de mandioca, também obtiveram aumento na produção de biogás quando adicionado a polpa ao dejetos. Possivelmente por um melhor ajuste da relação C/N associada a alta degradabilidade da fonte de carbono utilizada, que possibilitou melhores condições aos microrganismos envolvidos na biodigestão.

Quanto ao comportamento da produção de biogás durante o período experimental de 47 dias (~7semanas), os tratamentos em co-digestão geraram um aumento nas produções específicas de biogás por SV adicionado, que foram de 19,8 e 17,3% para BD 10/1 e M 10/1, respectivamente, se comparados ao controle, o que demonstra maior disponibilidade das fontes de carbono acrescidas diariamente, resultando assim em maiores produções de biogás (Figura 5).

As pequenas variações nas produções de biogás ao longo do tempo são esperadas, visto que os substratos utilizados para preparo dos afluentes sofrem oscilações na sua composição. O dejetos era coletado diariamente e a composição das raízes utilizadas variam de acordo com a idade de colheita, fertilidade do solo, umidade, temperatura entre outros.

ORRICO JÚNIOR et al. (2009) avaliando a digestão anaeróbia de dejetos de suínos (fase de crescimento) em biodigestores tubulares semi-contínuos, adotando 2 a 2,5% de ST, relataram rendimento de  $0,846 \text{ L}$  de biogás por grama de  $SV_{\text{adic}}$ , para TRH de 36 dias. O valor

relatado pelos autores é semelhante ao encontrado no presente estudo ( $0,808 \text{ L g}^{-1} \text{ SV}$ ), com teor de ST de entrada de 2,0%.

ANDRADE et al. (2016) trabalhando com digestores semi-contínuos, TRH de 30 dias e ST de 4% relataram rendimento de biogás de  $0,843 \text{ L g}^{-1}$  de SV adicionados para a co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno com 10% (volume/volume) de manipueira, resíduo líquido da extração do amido da mandioca. Este rendimento encontrado pelos autores foi próximo ao verificado no presente estudo (Figura 6).

Os tratamentos BD 10/1 e M 10/1 apresentaram os maiores valores para a produção de  $\text{CH}_4$  por SV adicionados em relação ao DS isolado ( $P < 0,05$ ). A adição da BD e da M possibilitaram acréscimo de  $\text{CH}_4$ , 31,5 e 21,8%, respectivamente, em relação à quantidade de SV adicionados. Isto foi provavelmente devido a um aumento na disponibilidade de carboidratos facilmente degradáveis no substrato, proporcionado pela BD e pela M.

O tratamento BD 10/1 apresentou a maior concentração ( $P < 0,05$ ) de  $\text{CH}_4$  na composição do biogás, seguida de M 10/1. Os teores médios de  $\text{CH}_4$  encontrados durante o período avaliado foram: 59,7; 65,5 e 61,9% para os tratamentos controle, BD 10/1 e M 10/1, respectivamente. A co-digestão do DS com BD e M, além de promover um aumento na produção de biogás, proporcionou uma melhor qualidade deste, maximizando a concentração de  $\text{CH}_4$ .

PANICHNUMSIN et al. (2010) obtiveram uma produção específica de  $362 \text{ L kg}^{-1} \text{ SV}$  adicionados para o dejetos de suíno sozinho, que foi menor do que o potencial encontrado nesse presente trabalho, de  $481,49 \text{ L kg}^{-1} \text{ SV}$  adicionados. Os autores obtiveram aumento na produção específica de  $\text{CH}_4$  por SV adicionados, sobre o tratamento controle, até a inclusão de 60% de polpa de mandioca, a partir dessa proporção houve diminuição no potencial. Para o tratamento com inclusão de polpa de mandioca em proporção ao dejetos de suíno de 20:80 (relação C/N de 17/1) a produção específica de  $\text{CH}_4$  por kg de SV adicionados foi de  $391 \text{ L kg}^{-1} \text{ SV}$  adicionados,

que é menor do que o encontrado nesse trabalho para a inclusão de BD e M nas relações de 10/1 (633,33 e 586,61 L kg<sup>-1</sup> SV adicionados, respectivamente).

Tendo em consideração que a polpa de mandioca é um resíduo, sua constituição possui uma maior concentração de fibras e menor concentração de amido que os materiais *in natura*, assim é possível perceber que a relação C/N em um substrato em digestão não pode ser o único parâmetro para uma boa produção, mas sim a disponibilidade dessas fontes de carbono contidas no substrato.

## 2.4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho conclui-se que a inclusão de BD e M na relação C/N de 10/1, em co-digestão com os DS utilizando biodigestores de alimentação semi-contínua, é uma proporção recomendada para gerar maiores quantidades de biogás e metano e conseqüentemente maximizar os potenciais de biogás e metano por sólidos adicionados ao sistema de biodigestão.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUDI, K. et al. Improvement of exhausted sugar beet cossettes anaerobic digestion process by co-digestion with pig manure. **Energy Fuels**, v. 29, n. 2, p. 754-762, 2015.

ANDRADE, W. R. et al. Biogas production from ruminant and monogastric animal manure co-digested with manipueira. **Archivos de Zootecnia**, v. 65, n. 251, 2016.

APHA. **American Public Health Association. Standard methods for examination of water and wastewater**. 21th ed. Washington: American Water Works Association, 1.368p. 2005.

ASTALS, S. et al. Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate. **Bioresource Technology**, v. 110, p. 63-70, abr. 2012.

AWAIS, M. et al. Methane production and kinetic modeling for co-digestion of manure with lignocellulosic residues. **Energy Fuels**, v. 30, n. 12, p. 10516-10523, 2016.

BORJA, R. Biogas production. **Comprehensive Biotechnology**, v.2, p. 785-798, 2011.

CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás**. 1985. 75f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1985.

CAMPOS, C. M. M. et al. Desenvolvimento e operação de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) no tratamento dos efluentes da suinocultura em escala laboratorial. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 1, p. 140-147, jan./fev. 2006.

DAMACENO, F. M. **Codigestão anaeróbia do lodo obtido em abatedouros de frangos e batata-doce**: valorização energética e agrônômica. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. Volatile acids by direc titration. **Journal Water Pollution Control Federation**, Alexandria, v. 33, n. 4, p. 356-365, abr. 1961.

DORNACK, C. Biogas production from organic waste and biomass - fundamentals and current situation. **Journal Vietnamese Environment**, v. 3, n. 1, p. 43-49, 2012.

ESPOSITO, G. et al. Anaerobic co-digestion of organic wastes. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 11, n. 4, p. 325-341, dez. 2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 2, p. 109-112, mar./abr. 2014.

HASSAN, M. et al. Batch and semi-continuous anaerobic co-digestion of goose manure with alkali solubilized wheat straw: a case of carbon to nitrogen ratio and organic loading rate regression optimization. **Bioresource Technology**, v. 230, p. 24-32, abr. 2017.

KOHYAMA, K.; NISHINARI, K. Cellulose derivates effects on gelatinization and retrogradation of sweet potato starch. **Journal of Food Science**, v. 57, n. 1, p. 128-131, 1992.

KUNZ, A. et al. **Operacionalização de biodigestores: processos bioquímicos na digestão anaeróbia**. Foz do Iguaçu, PR: CIBiogás; Concórdia, SC: Embrapa, 2016. 22 p.

LE, C.; STUCKEY, D. C. Impact of feed carbohydrates and nitrogen source on the production of soluble microbial products (SMPs) in anaerobic digestion. **Water Research**, v. 122, p. 10-16, 2017.

LORIMOR, J. et al. **Manure Characteristics**. Section 1. Mid-West Plan Service MWPS-18, 2000. p. 18.

MATA-ALVAREZ, J. et al. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 1, p. 3-16, ago. 2000.

MATA-ALVAREZ, J. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412-427, 2014.

METCALF, E.; EDDY, M. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1771p.

MIRANDA, A. P. et al. Anaerobic biodigestion of pigs feces in the initial growing and finishing stages fed with diets formulated with corn or sorghum. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 47-56, jan./fev. 2012.

MOLINUEVO-SALCES, B. et al. Anaerobic co-digestion of livestock wastes with vegetable processing wastes: a statistical analysis. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 24, p. 9479-9485, dez. 2010.

MOLINUEVO-SALCES, B. et al. Vegetable processing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: evaluation in terms of methane yield and SEM characterization. **Applied energy**, v. 91, n. 1, p. 36-42, mar. 2012.

OKUDOH, V. et al. The potential of cassava biomass and applicable technologies for sustainable biogas production in South Africa: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 1035-1052, 2014.

ORRICO JÚNIOR, M. A. et al. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 474-482, jul./set. 2009.

PANICHNUMSIN, P. et al. Enhanced biomethanation in co-digestion of cassava pulp and pig manure using a two-phase anaerobic system. **Journal of Sustainable Energy & Environment**, v. 3, n. 2, p. 73-79, 2012.

PANICHNUMSIN, P. et al. Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 8, p. 1117-1124, ago. 2010.

RAHMAN, H. et al. Morpho-physiological evaluation of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) genotypes in acidic soil. **Asian Journal of Crop Science**, v. 7, n. 4, p. 267-276, 2015.

RIPLEY, L. E. et al. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Water Pollution Control Federation**, v. 58, n. 5, p. 406-411, mai. 1986.

SCHWINGEL, A. W. **Co-digestão de excretas de suínos associadas à doses crescentes de glicerina bruta**. 2014. 60 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2014.

SILVEIRA, M. A. Batata-doce: uma nova alternativa para a produção de etanol. In: **Álcool combustível**. Instituto Euvaldo Lodi: Brasília, 15 p. 2008.

TRAUTMANN, N. M.; KRASNY, M. E. **Composting in the classroom**: Scientific inquiry for high school students. Cornell: Cornell University, 1997. 126 p.

WANG, X. et al. Effects of temperature and carbon-nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: focusing on ammonia inhibition. **Plos One**, v. 9, n. 5, mai. 2014.

WANG, X. et al. Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. **Bioresource Technology**, v. 120, p. 78-83, 2012.

WU, X. et al. Biogas and CH<sub>4</sub> productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 4042-4047, 2010.

ZHANG, T. et al. Influence of initial pH on thermophilic anaerobic co-digestion of swine manure and maize stalk. **Waste management**, v. 35, p. 119-126, jan. 2015.

.

## IMPLICAÇÕES

- O uso da batata doce e da mandioca ao dejetos de suíno podem implicar em ganhos para o pequeno produtor, gerando biogás e aumentando a concentração de metano no mesmo. Um gás com alto teor de metano possui elevado valor calorífico, podendo ser utilizado em bombas motogeradoras e também como energia térmica. Como essas duas raízes são culturas de baixo valor de cultivo, para serem usadas como *energy crops*, e também são encontradas, quando não atingem um padrão de prateleira, como resíduos, se mostram como uma alternativa na melhoria de vida no campo, com acréscimo ao valor obtido por meio do emprego da técnica de co-digestão.
- Em biodigestores modelo batelada a inclusão das raízes não obteve resultados similares, sendo indicado então que em novos trabalhos se utilizem menores concentrações de ST, temperaturas controladas e realização de análises de composição mais detalhadas das raízes, principalmente das fontes de carbono que elas possuem, além da concentração de ácido cianídrico contido na mandioca.
- Utilizando biodigestores de alimentação semi-contínua, recomenda-se, que se façam trabalhos com menores tempos de retenção hidráulica e maiores inclusões das raízes para se encontrar nesse modelo de biodigestão (que condiz mais com as condições de campo) doses ideais de inclusão e os benefícios que estas proporcionam para o sistema de biodigestão.

TABELA 1. Caracterização dos substratos utilizados nos biodigestores modelo batelada.

| Componentes | Dejeto | Batata Doce | Mandioca |
|-------------|--------|-------------|----------|
| ST (%)      | 29,20  | 27,68       | 39,92    |
| SV (%)      | 80,68  | 97,00       | 96,99    |
| C (%)       | 29,62  | 38,07       | 38,77    |
| N (%)       | 3,40   | 0,79        | 0,53     |
| C/N         | 8,72   | 48,27       | 73,25    |



TABELA 2. Descrição das quantidades (g) de dejetos, batata doce e mandioca nos tratamentos que compuseram o ensaio com biodigestores modelo batelada.

| Componentes | Dejeto (g) | Batata Doce (g) | Mandioca (g) | Inóculo (g) | Água (g) |
|-------------|------------|-----------------|--------------|-------------|----------|
| Controle    | 247        | -               | -            | 270         | 1283     |
| BD 10/1     | 216        | 33              | -            | 270         | 1282     |
| BD 13/1     | 162        | 89              | -            | 270         | 1279     |
| BD 17/1     | 115        | 138             | -            | 270         | 1276     |
| BD 22/1     | 78         | 178             | -            | 270         | 1274     |
| M 10/1      | 218        | -               | 21           | 270         | 1291     |
| M 13/1      | 170        | -               | 57           | 270         | 1304     |
| M 17/1      | 127        | -               | 88           | 270         | 1316     |
| M 22/1      | 93         | -               | 113          | 270         | 1325     |

TABELA 3. Caracterização dos substratos utilizados nos biodigestores de alimentação semi-contínua.

| Componentes | Dejeto | Batata Doce | Mandioca |
|-------------|--------|-------------|----------|
| ST (%)      | 29,26  | 27,23       | 38,32    |
| SV (%)      | 81,95  | 96,36       | 95,51    |
| C (%)       | 29,62  | 38,07       | 38,77    |
| N (%)       | 3,62   | 0,79        | 0,53     |
| C/N         | 8,19   | 48,31       | 73,26    |

TABELA 4. Quantidades de dejetos, batata doce e mandioca nos tratamentos que compuseram o ensaio com biodigestores de alimentação semi-continua.

| Tratamentos | Quantidade |                 |              |           |
|-------------|------------|-----------------|--------------|-----------|
|             | Dejeto (g) | Batata Doce (g) | Mandioca (g) | Água (ml) |
| Controle    | 137        | -               | -            | 1863      |
| BD 10/1     | 113        | 26              | -            | 1861      |
| M 10/1      | 114        | -               | 17           | 1868      |

Controle: dejetos suíno sem adição de fontes de carbono (tratamento controle); BD 10/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 10/1; M10/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 10/1.

TABELA 5. Teores e reduções dos ST e SV no afluente e efluente em biodigestores modelo batelada na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca com diferentes relações C/N.

| Tratamento | ST              |                 |                | SV              |                 |                |
|------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
|            | Afluente<br>(g) | Efluente<br>(g) | Redução<br>(%) | Afluente<br>(g) | Efluente<br>(g) | Redução<br>(%) |
| Controle   | 66,01           | 36,58           | 44,47 a        | 51,53           | 25,58           | 50,31 bc       |
| BD 10/1    | 67,17           | 35,23           | 47,54 a        | 58,11           | 24,78           | 57,34 a        |
| BD 13/1    | 65,19           | 35,15           | 45,78 a        | 56,06           | 24,83           | 55,46 abc      |
| BD 17/1    | 63,30           | 34,98           | 44,67 a        | 52,21           | 24,99           | 52,06 abc      |
| BD 22/1    | 63,03           | 36,20           | 42,38 ab       | 54,63           | 27,38           | 49,71 c        |
| M 10/1     | 66,68           | 36,63           | 45,04 a        | 55,69           | 24,34           | 56,28 ab       |
| M 13/1     | 63,07           | 40,68           | 35,40 bc       | 54,06           | 33,61           | 37,73 d        |
| M 17/1     | 63,13           | 41,81           | 33,77 c        | 55,49           | 35,53           | 35,94 d        |
| M 22/1     | 63,02           | 44,05           | 30,08 c        | 55,31           | 37,06           | 32,96 d        |
| CV (%)     | -               | -               | 7,10           | -               | -               | 5,46           |

Controle: dejetos suíno sem adição de fontes de carbono (tratamento controle); BD10/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 10/1; BD13/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 13/1; BD17/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 17/1; BD22/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 22/1; M10/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 10/1; M13/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 13/1; M17/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 17/1; M22/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 22/1; CV: coeficiente de variação.

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

TABELA 6. Produções específicas de biogás por quantidades de ST e SV adicionadas em biodigestores modelo batelada na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca com diferentes relações C/N.

| Trat.         | Produção de biogás (L Kg <sup>-1</sup> ) |             |
|---------------|--|-------------|
|               | ST adic.                                 | SV adic.    |
| Controle      | 238 c                                    | 304 ab      |
| BD 10/1       | 286 a                                    | 331 a       |
| BD 13/1       | 259 bc                                   | 301 ab      |
| BD 17/1       | 246 bc                                   | 299 b       |
| BD 22/1       | 94 d                                     | 109 c       |
| M 10/1        | 270 ab                                   | 323 ab      |
| M 13/1        | 54 e                                     | 64 d        |
| M 17/1        | 35 e                                     | 40 d        |
| M 22/1        | 29 e                                     | 33 d        |
| <b>CV (%)</b> | <b>6,73</b>                              | <b>6,57</b> |

Controle: dejetos suíno sem adição de fontes de carbono (tratamento controle); BD10/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 10/1; BD13/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 13/1; BD17/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 17/1; BD22/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 22/1; M10/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 10/1; M13/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 13/1; M17/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 17/1; M22/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 22/1; CV: coeficiente de variação.

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

TABELA 7. Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) no afluente e efluente para os diferentes tratamentos.

| Tratamentos | Afluente |       |
|-------------|----------|-------|
|             | C (%)    | N (%) |
| Controle    | 28,70    | 3,37  |
| BD 10/1     | 38,56    | 3,18  |
| M 10/1      | 38,13    | 3,09  |
| Efluente    |          |       |
| Controle    | 22,18    | 3,02  |
| BD 10/1     | 21,01    | 2,94  |
| M 10/1      | 21,96    | 3,06  |

CONT.: dejetos suínos sem adição de fontes de carbono (tratamento controle); BD10/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 10/1; M10/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 10/1.

TABELA 8. Teores (g) e reduções de ST e SV, no afluente e efluente em biodigestores de alimentação semi-contínua na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca.

| Tratamentos | ST       |          |             | SV       |          |             |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|
|             | Afluente | Efluente | Redução (%) | Afluente | Efluente | Redução (%) |
| Controle    | 34,09    | 7,91     | 76,76 a     | 27,54    | 3,79     | 86,20 a     |
| BD 10/1     | 32,35    | 7,86     | 75,69 a     | 26,98    | 3,85     | 85,72 a     |
| M 10/1      | 32,63    | 7,83     | 76,01 a     | 27,13    | 3,88     | 85,70 a     |
| CV (%)      | -        | -        | 1,16        | -        | -        | 0,66        |

CONTROLE: dejetos suíno sem adição de fontes de carbono (tratamento controle); BD10/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 10/1; M10/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 10/1; CV: coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

TABELA 9. Produção de biogás diária e produção específica de biogás por quilogramas de ST e SV adicionados, em biodigestores semi-contínuos na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca

| Tratamento | Produção de biogás |   |   |
|------------|--------------------|---|---|
|            | L d <sup>-1</sup>  | L Kg ST <sub>adic</sub> d <sup>-1</sup> | L Kg SV <sub>adic</sub> d <sup>-1</sup> |
| Controle   | 22,21 c            | 652 b                                   | 808 b                                   |
| BD 10/1    | 26,10 a            | 807 a                                   | 968 a                                   |
| M 10/1     | 25,71 b            | 788 a                                   | 948 a                                   |
| CV (%)     | 0,29               | 2,84                                    | 2,85                                    |

CONTROLE: dejetos suíno sem adição de fontes de carbono (tratamento controle); BD10/1: adição de batata doce em ajuste de C/N 10/1; M10/1: adição de mandioca em ajuste de C/N 10/1; CV: coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.



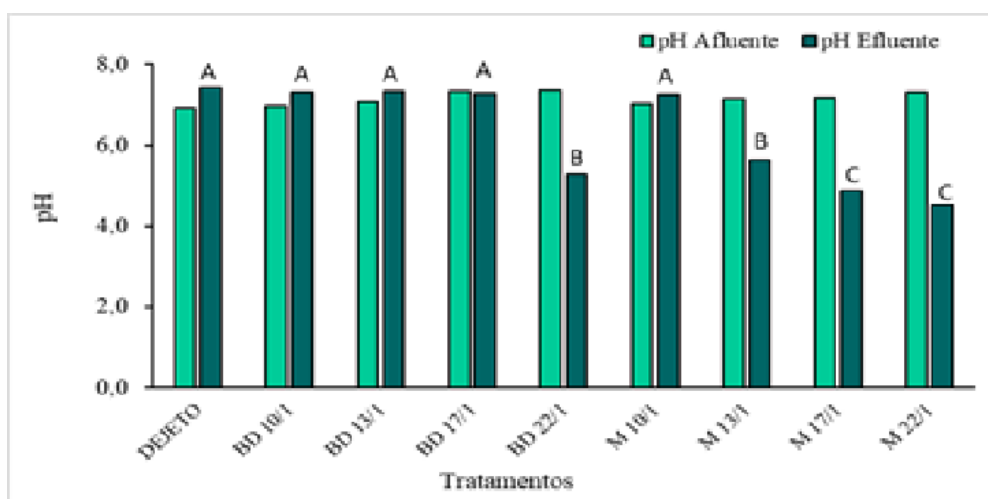


Figura 1. Valores de pH no afluente e efluente em biodigestores modelo batelada, na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca com diferentes relações C/N.

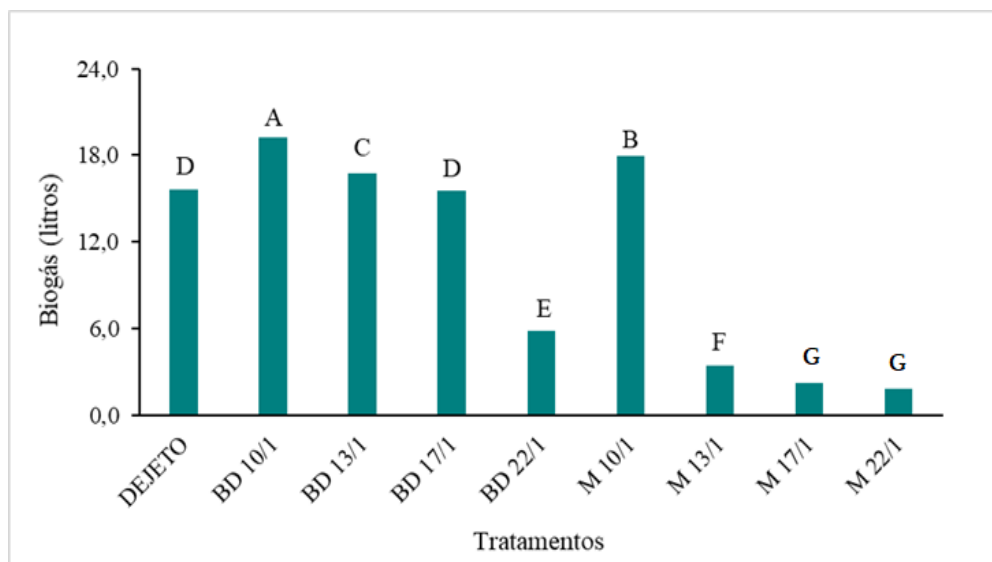


Figura 2. Produção total de biogás obtidos em biodigestores modelo batelada, na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca com diferentes relações C/N.

Médias seguidas de mesma letra, nas barras, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

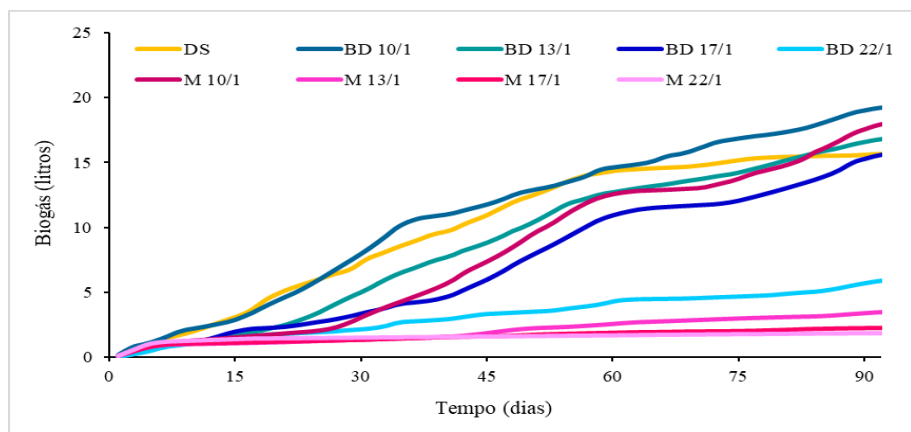


Figura 3. Produção acumulada de biogás no tempo de retenção hidráulica de 92 dias, obtidos em biodigestores modelo batelada, na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata-doce e mandioca com diferentes relações C/N.

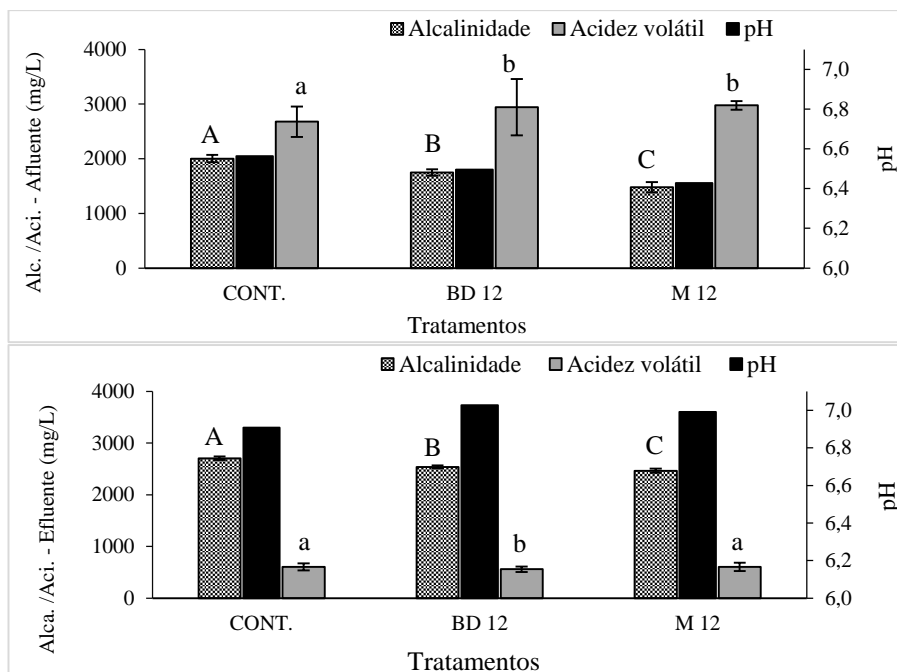


Figura 4. Alcalinidade, acidez volátil e pH, no afluente (A) e efluente (B) em biodigestores semi-contínuos na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca. Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.



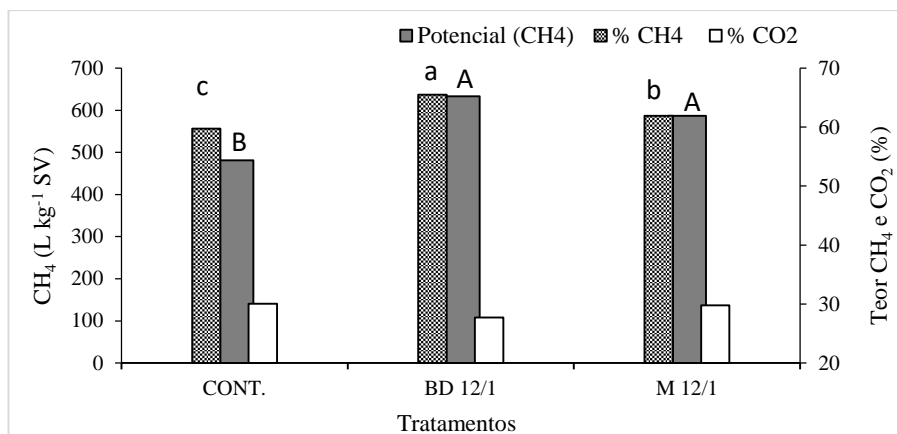


Figura 5. Produção específica de metano por SV adicionado e teores de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, em biodigestores semi-contínuos na co-digestão anaeróbia de dejetos de suíno, batata doce e mandioca.

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.