

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
ESPECIALIZAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA CADEIA PRODUTIVA DO BIOGÁS**

**JOÃO HENRIQUE LIMA ALINO**

**DIGESTÃO ANAERÓBIA DE BAGAÇO DE CANA- DE-AÇÚCAR:  
ESTRATÉGIA DE ARMAZENAMENTO E PRÉ-TRATAMENTO PARA  
AUMENTAR A PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

MEDIANEIRA

2019

JOÃO HENRIQUE LIMA ALINO

**DIGESTÃO ANAERÓBIA DE BAGAÇO DE CANA- DE-AÇÚCAR:  
ESTRATÉGIA DE ARMAZENAMENTO E PRÉ-TRATAMENTO PARA  
AUMENTAR A PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Projeto de pesquisa apresentado como requisito parcial para avaliação da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Medianeira.

Aluno: João Henrique Lima Alino

Professor Orientador: Thiago Edwiges

MEDIANEIRA

2018



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva  
do Biogás



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

DIGESTÃO ANAERÓBIA DE BAGAÇO DE CANA- DE-AÇÚCAR: ESTRATÉGIA DE  
ARMAZENAMENTO E PRÉ-TRATAMENTO PARA AUMENTAR A PRODUÇÃO DE  
BIOGÁS

Por

**João Henrique Lima Alino**

Esta monografia foi apresentada às 09:00 h do dia 4 de Maio de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista no Curso de Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, Modalidade de Ensino a Distância, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof<sup>a</sup>. Dr. Thiago Edwiges  
UTFPR – Câmpus Medianeira  
(orientador)

---

Prof Dr. Laercio Mantovani Frare  
UTFPR – Câmpus Medianeira

---

Prof<sup>a</sup>. Dr. Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa  
UNIOESTE – Câmpus Cascavel

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso-.

## RESUMO

ALINO, João H. L. **Digestão anaeróbia de bagaço de cana-de-açúcar: estratégia de armazenamento e pré-tratamento para aumentar a produção de biogás.** 2019. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

O bagaço de cana-de-açúcar (BC) destaca-se como biomassa lignocelulósica proveniente da produção do etanol. Este resíduo apresenta potencial de geração de energia, por meio da digestão anaeróbia (DA). Em contrapartida, os resíduos lignocelulósicos apresentam estrutura complexa, composta por celulose, hemicelulose e lignina, sendo necessário pré-tratamentos para melhorar a digestibilidade destes resíduos e conseqüentemente o processo de DA. No entanto, estes pré-tratamentos apresentam elevado custo de implementação e geram subprodutos tóxicos ao meio ambiente. Como alternativa, o co-armazenamento entre substratos lignocelulósicos e resíduos orgânicos, pode proporcionar o aumento da produção de biogás, reduzindo os custos com reagentes e mitigando os impactos causados ao meio ambiente. A partir disso, objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do co-armazenamento do BC com resíduos orgânicos, utilizando três concentrações de BC para resíduos de frutas e vegetais (RFV) (5%, 10% e 15%) e para soro de leite (SL) (10%, 20% e 25%) na produção de biogás. A sinergia de produção de biogás da mistura foi comparada com a produção teórica (PBMt) de biogás e com o efeito de pré-tratamento convencional com NaOH (1%, 5% e 10%). A produção de metano do co-armazenamento de RFV+BC5% apresentou a melhor taxa de conversão em metano, com 27% de eficiência quando comparado ao PBMt, enquanto nenhuma das concentrações de SL apresentaram eficiência positiva. O pré-tratamento alcalino com NaOH apresentou eficiência de produção de metano quando comparado a BC *in natura* para 5% e 10%. O estudo mostrou que a baixa concentração de resíduos lignocelulósicos proporciona o aumento da superfície de contato com o co-substrato ácido, favorecendo o pré-tratamento por meio do ácido gerado na degradação.

Palavras-chave: Resíduos lignocelulósicos; PBM; co-armazenamento; metano.

## ABSTRACT

ALINO, João H. L. **Anaerobic digestion of sugarcane bagasse: storage and pretreatment strategy to increase biogas production.** 2019. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

Sugarcane bagasse (SCB) stands out as lignocellulosic biomass from the production of ethanol. This residue presents potential of energy generation, through anaerobic digestion (AD), however the lignocellulosic residues present a complex structure, composed of cellulose, hemicellulose and lignin, being necessary pre-treatments to improve the digestibility of these residues and consequently the process of AD. However, these pre-treatments are expensive to implement and generate by-products toxic to the environment. As an alternative, co-storage between lignocellulosic substrates and organic waste can provide increased biogas production, reducing reagent costs and mitigating environmental impacts. The objective of this work was to evaluate the effect of co-storage of SCB with organic residues using three concentrations of SCB for fruit and vegetable residues (FVW) (5%, 10% and 15%) and for whey (CW) (10%, 20% and 25%) in biogas production. The biogas production synergy of the blend was compared with the theoretical biogas production (PBMT) and with the conventional pretreatment effect with NaOH (1%, 5% and 10%). Methane production from the co-storage of FVW + SCB5% presented the best conversion rate in methane, with 27% efficiency when compared to PBMT, whereas none of the concentrations of CW presented efficiency. Conventional alkaline pretreatment with NaOH showed efficiency when compared to in natura SCB to 5% and 10%. The study showed that the low concentration of lignocellulosic residues provides the increase of the contact surface with the acidic co-substrate, favoring the pretreatment through the acid generated in the degradation.

Keywords: Lignocellulosic residues; BMP; co-storage; methane.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>8</b>
2.1 SUBSTRATOS E MÉTODOS ANALÍTICOS .....	8
2.2 PROCEDIMENTO DE CO-ARMAZENAMENTO.....	8
2.3 TESTES DE DIGESTÃO ANAERÓBIA EM BATELADA.....	9
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>11</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO INÓCULO E SUBSTRATOS .....	11
3.2 TESTES DE DIGESTÃO ANAERÓBIA EM BATELADA.....	12
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>16</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>17</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O etanol proveniente da cana-de-açúcar, destaca-se como fonte renovável de energia, tornando-se combustível competitivo e com baixa emissão de carbono, quando comparado aos combustíveis fósseis (Joppert *et al.*, 2017). O processo de produção de etanol é amplamente difundido e apresenta potencial de crescimento em todo o mundo, sendo o Brasil responsável pela produção de mais de 28 milhões de m<sup>3</sup> por ano. No entanto, o processo de produção de etanol produz como subproduto o bagaço de cana-de-açúcar (BC), sendo gerado mundialmente mais de 540 milhões de toneladas de BC por ano, cerca de 30% da cana colhida (Nosratpour *et al.* 2018). A falta de locais apropriados para a destinação destes resíduos e o acúmulo desenfreado de BC, faz com que estes resíduos demandem tratamento para a minimização dos impactos causados por eles (Adarme *et al.*, 2017).

Dentre os tratamentos possíveis, a digestão anaeróbia (DA) é uma alternativa técnica e economicamente viável, pois transforma o passivo ambiental em ativo econômico, por meio da recuperação energética destes resíduos (Martínez *et al.*, 2018). Este processo converte a matéria orgânica em basicamente CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, por meio do metabolismo de diferentes bactérias anaeróbias. No entanto, os resíduos lignocelulósicos, como os resíduos de BC, apresentam estrutura complexa, composta por celulose, hemicelulose e lignina, responsáveis por fornecer estrutura e sustentação a planta e limitam a digestão anaeróbia (DA). Dentre os componentes, a lignina apresenta estrutura rígida, insolúvel em água e resistente a ataques químicos e biológicos, tornando este o componente mais recalcitrante da parede celular da planta e a limitante no processo de DA (Zheng *et al.*, 2014).

Tais propriedades exigem que estes resíduos passem por pré-tratamentos para aumentar a eficiência de conversão de biogás, contribuindo para a redução da cristalinidade e o grau de polimerização da celulose, remoção da lignina e hemicelulose e aumento a área acessível para os microrganismos (Yu *et al.*, 2019). Estudos recentes foram realizados com o objetivo de aumentar a digestibilidade microbiana, aplicando pré-tratamentos convencionais como o mecânico, químico, biológico e a combinação entre eles (Bolado-Rodríguez *et al.*, 2016; Jin *et al.*, 2015;

Qiao et al., 2011; Shen et al., 2014; Zheng et al., 2014). Dentre eles o pré-tratamento químico é o método mais utilizado para alterar as propriedades químicas e físicas dos resíduos lignocelulósicos, sendo utilizado ácidos, bases e compostos iônicos, além da associação com o pré-tratamento térmico.

No entanto, estes pré-tratamentos apresentam elevado custo de implementação em escala real e geram subprodutos tóxicos ao meio ambiente (Larsen, *et al.*2017; Koupaie *et al.*, 2018). Como alternativa ao elevado custo de operação, o co-armazenamento entre substratos lignocelulósicos e resíduos orgânicos, proporciona o aumento da eficiência de produção de biogás, reduzindo os custos com reagentes e eliminando a geração de subprodutos nocivos ao meio ambiente (Zheng *et al.*,2014). A mistura dos resíduos e o tempo de contato aplicado provoca a fermentação inicial dos compostos orgânicos e possibilita a formação de ácido láctico, sendo responsável pela queda do pH. Logo o processo favorece a fermentação de diversos nutrientes, alterando a estrutura da biomassa lignocelulósica e aumentando a produção de biogás (Thompson et al., 2005).

Contudo, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do co-armazenamento do BC com dois tipos de resíduos orgânicos, sendo estes os resíduos de frutas e vegetais (RFV) e soro de leite (SL), na produção de metano. Para isso foram utilizadas três concentrações para cada co-armazenamento e comparada a sinergia de produção de metano da mistura com o rendimento proporcional de cada substrato. O pré-tratamento alcalino foi utilizado como comparação da eficiência de produção de metano de ambos os pré-tratamentos a partir de três concentrações de NaOH.



## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 SUBSTRATOS E MÉTODOS ANALÍTICOS

As amostras de BC, SL e RFV foram coletadas no mês de novembro de 2018 e são provenientes de um empreendimento local que realiza a extração do caldo para o consumo, um laticínio responsável pelo processamento de derivados do leite e um centro de distribuição de frutas e vegetais, respectivamente. Após a coleta, o BC e RFV foram triturados até obter um tamanho de partícula menor ou igual a 10 mm para garantir a homogeneização do substrato e a precisão dos testes em batelada (Holliger et al., 2016).

A caracterização físico-química foi realizada para a determinar o teor de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e o pH, sendo utilizados como parâmetro para a correção do balanço de massa dos testes em batelada (APHA, 2005). Já a composição química dos substratos foi realizada por meio da determinação do nitrogênio total Kjeldahl (APHA, 2005), lipídeos (Bligh&Dyer, 1959) e proteínas (FAO, 2002).

### 2.2 PROCEDIMENTO DE CO-ARMAZENAMENTO

O pré tratamento do resíduo lignocelulósico ocorreu por meio do co-armazenamento do BC com os resíduos de RFV e SL, no qual foram determinadas três concentrações de BC para cada mistura de RFV e SL. As concentrações foram definidas com base na capacidade do RFV e SL em umidificar o BC, estabelecendo assim a concentração máxima utilizada. Concentrações intermediárias foram utilizadas para avaliar a sinergia da mistura. As misturas foram armazenadas, cobertas e mantidas em contato por um período de 7 dias à temperatura ambiente (25 °C), também foi realizado o monitoramento do pH da mistura (Tabela 1).

**Tabela 1 - Concentração de BC nas misturas de RFV e SL e as respectivas massas utilizadas**

SUBSTRATO	CONCENTRAÇÃO DE BC (%)	RFV (g)	SL (g)	BC (g)	ST (g)	SV (g)
RFV + BC	5	475	ND	25	59,5	55,9
	10	450	ND	50	66,4	62,8
	15	425	ND	75	73,4	69,7
SL + BC	10	ND	450	50	49,8	47,1
	20	ND	400	100	65,5	62,6
	25	ND	375	125	73,4	70,4

ND: Não determinado. RFV: Resíduos de frutas e vegetais; BC: Bagaço de cana-de-açúcar; SL: Soro de leite.

**Fonte: Autoria própria**

Como comparação ao teste de co-armazenamento foi utilizado o pré-tratamento convencional alcalino com NaOH em concentrações 1%, 5% e 10%, por um período de 12 horas a temperatura ambiente (25°C). Em um béquer foi adicionado 34,5 g de HCl, em 10 g de BC, que representa 10% de ST da mistura (Liu et al., 2015).

Após o tempo de contato, o lixiviado foi coletado e congelado para análises posteriores, enquanto a amostra de BC foi lavada em água corrente até pH neutro. O pré-tratamento alcalino ocorreu em uma etapa posterior ao co-armazenamento, utilizando o mesmo resíduo de BC (BC 2° teste), que foi conservado em um refrigerador por um período de 3 meses a uma temperatura de 4°C, fazendo com que o BC perdesse carbono e apresentasse valores diferentes dos iniciais. A partir deste pré-tratamento foi avaliada a eficiência de produção de metano por massa de reagente utilizado, este dado permitiu mensurar a conversão de metano com o gasto de reagente alcalino.

### 2.3 TESTES DE DIGESTÃO ANAERÓBIA EM BATELADA

A determinação do Potencial Bioquímico de Metano (PBM) das amostras foi realizada por meio de parâmetros propostos pela VDI 4630, utilizando frascos de 100 mL. Para isso, foi utilizado volume de 50 mL para a digestão e 50 mL de *headspace*. A massa de inóculo e substrato adicionada no reator foi calculada com base na análise de sólidos, sendo estabelecido relação inóculo substrato (RIS) igual a 3. O monitoramento ocorreu por meio do registro diário da produção de biogás, até

que o volume de biogás diário fosse inferior a 1% do volume acumulado (VDI 4630, 2006).

O inóculo utilizado foi produzido a partir de uma mistura de dejetos bovinos e efluentes de biodigestor suíno e biodigestor bovino na proporção de 1:0,5:0,5, respectivamente, mantido em temperatura mesofílica (37 °C). A partir disso o inóculo foi aclimatado com alimentação semanal contendo uma mistura de substratos orgânicos, com o objetivo de proporcionar a diversidade bacteriana, possibilitando maior degradação de todos os componentes do substrato. Mais informações sobre a composição e procedimento detalhado de aclimação pode ser encontrado em Edwiges et al. (2018).

O teste de PBM foi composto por 12 tratamentos e dois testes controle, nos quais foram incubados em triplicata, totalizando 42 frascos. Inóculo e celulose microcristalina foram utilizados como controle nos testes em batelada, sendo estes utilizados para o cálculo do balanço de massa e para validação do inóculo utilizado para os testes em batelada. A VDI 4630 recomenda produção mínima de biogás de 80% do valor teórico da celulose ( $740 - 750 \text{ mL}_N \text{ g SV}^{-1}$ ).

As produções de metano proveniente do co-armazenamento foram comparadas com os respectivos valores ponderados da mistura PBM ( $\text{PBM}_P$ ), obtidos por meio da soma das produções individuais de cada substrato e das respectivas proporções de SV adicionada a cada reator. A partir disso foi possível avaliar a sinergia dos co-armazenamentos e a eficiência de produção de metano.

A composição do biogás foi determinada por meio de cromatografia gasosa (ASTM D1945-14, 2014) em cromatógrafo (Perkin Elmer – Clarus 680) com Detector de Condutividade Térmica (TCD), coluna empacotada Plot Q, com 30 m de comprimento e diâmetro interno de 0,32 mm, utilizando hélio como gás de arraste com fluxo de  $30 \text{ mL min}^{-1}$ . A rampa de temperatura do forno foi programada para aumentar de 32 a 1.000 °C com taxa de  $200 \text{ °C min}^{-1}$  e tempo de espera final de 2 min.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO INÓCULO E SUBSTRATOS

O inóculo utilizado no experimento apresentou teor de ST, SV em base seca ( $SV_{bs}$ ) e pH de  $3,1 \pm 0,01$ ,  $58,3\% \pm 0,5\%$  e 8,5, respectivamente. A extração do caldo presente na cana-de-açúcar gerou como subproduto o BC, caracterizado pelo baixo teor de umidade ( $38,3 \pm 0,01\%$  ST), quando comparado à resíduos orgânicos como os RFV ( $10,5 \pm 0,16\%$  ST) e SL ( $6,8 \pm 0,01\%$  ST). Apesar do baixo teor de umidade o BC, assim como RFV ( $93,8 \pm 0,34\%$   $SV_{bs}$ ) e SL ( $92,5 \pm 0,13\%$   $SV_{bs}$ ), apresenta elevado teor de matéria orgânica ( $97,7 \pm 0,05\%$   $SV_{bs}$ ). No entanto, o índice de biodegradabilidade de BC, dado pela relação SV/ST foi de 2,5, sendo inferior aos valores obtidos por RFV (8,9) e SL (13,6). Vats et al. (2019) afirmam que o elevado valor na proporção de SV/ST está diretamente relacionado a maior hidrólise na DA (Tabela 2).

**Tabela 2 - Caracterização físico-química do inóculo, substrato e co-substratos.**

Substrato	ST (%)	SV (%)	SV/ST -	Lipídios (%)	Proteínas (%)	pH -
Inóculo	$3,1 \pm 0,01$	$58,3 \pm 0,50$	$18,9 \pm 0,15$	ND	ND	8,5
BC	$38,3 \pm 0,01$	$97,7 \pm 0,05$	$2,5 \pm 0,01$	$1,3 \pm 0,13$	$0,5 \pm 0,11$	ND
RFV	$10,5 \pm 0,16$	$93,8 \pm 0,34$	$8,9 \pm 0,17$	$0,6 \pm 0,05$	$1,2 \pm 0,04$	4,8
SL	$6,8 \pm 0,01$	$92,5 \pm 0,13$	$13,6 \pm 0,05$	$0,7 \pm 0,06$	$0,9 \pm 0,06$	6,9

ND = Não determinado

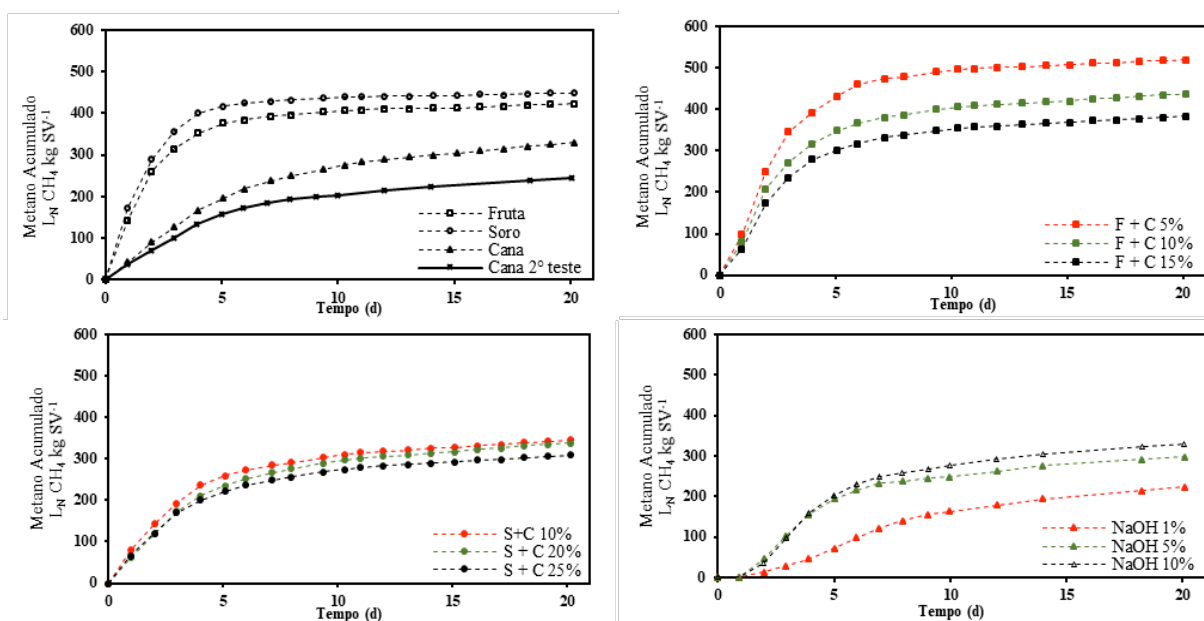
**Fonte: Autoria própria**

A composição dos substratos é dada pela determinação de lipídios, NTK e proteínas representados em porcentagem de matéria natural. O teor de lipídios presente no BC ( $1,3 \pm 0,13\%$ ) foi superior aos valores obtidos por RFV ( $0,6 \pm 0,05\%$ ) e SL ( $0,7 \pm 0,06\%$ ). Em contrapartida o RFV e SL apresentaram maiores concentrações de proteínas de  $1,2 \pm 0,04\%$  e  $0,9 \pm 0,06\%$ , respectivamente, quando comparados com BC ( $0,5 \pm 0,11\%$ ).

A mistura de RVF foi composta por alface, tomate, rúcula, melancia, manga, ameixa, melão, cebola, laranja, cebola roxa, chuchu, pimentão, pepino, batata doce e mamão. Esta mistura apresentou característica ácida, com valor de pH de 4,8, isto ocorreu devido à presença de resíduos potencialmente ácidos, como tomate, laranja e ameixa. Valores semelhantes foram encontrados por Vats et al. (2019), que reportaram pH de 4,75. Já o SL apresentou pH próximo da neutralidade, com valor de 6,9, similar ao estudo realizado por Kavacik & Topaloglu (2010), que reportaram pH de 6,6.

### 3.2 TESTES DE DIGESTÃO ANAERÓBIA EM BATELADA

Os valores de produção de metano para os resíduos de BC, BC 2º teste, RVF e SL foram utilizados como controle e apresentaram valores iguais a  $330 \pm 2,8$ ,  $246 \pm 5,9$ ,  $423 \pm 5,8$  e  $449 \pm 5,5$   $L_N CH_4$   $kg SV^{-1}$ , respectivamente. Resultados similares foram encontrados por Liu et al., 2015 ( $307 L_N CH_4$   $kg SV^{-1}$ ), Edwiges et al., 2018 ( $421 L_N CH_4$   $g kg SV^{-1}$ ) e Escalante et al., 2017 ( $510 L_N CH_4$   $kg SV^{-1}$ ) (Figura 2a).



**Figura 1 - Resultados experimentais de produção de metano do PBM. (a) Produção de biogás dos resíduos in natura; (b) co-armazenamento de RVF e BC; (c) co-armazenamento de SL e BC; (d) pré-tratamento convencional com NaOH.**

Fonte: Autoria própria

A rápida produção de metano durante a fase *lag* dos co-substratos (SL e RFV) é justificada pela presença de matérias facilmente biodegradáveis (Bertin et al., 2013; Wang et al., 2014). Já o resíduo lignocelulósico (BC), apresenta elevado teor de lignina levando a uma baixa biodegradabilidade deste tipo de resíduo (Rodriguez et al., 2016). Saidu et al., (2014), afirmam que a presença de lignina no processo de DA, acarreta no atraso da fase log ou, até mesmo, na inibição da produção de metano.

Como alternativa, a baixa biodegradabilidade do BC e ao potencial de acidificação do RFV e SL foi investigado o efeito do co-armazenamento destes resíduos contrastantes, no qual foi observado que o PBM do co-armazenamento de RFV + BC e SL + BC apresentaram maior produção conforme a concentração de BC era reduzida da mistura. Possivelmente a redução na concentração de resíduos lignocelulósicos aumenta a disponibilidade do ácido para o resíduo e, conseqüentemente, a superfície de contato, além de proporcionar a maior eficiência no pré-tratamento (Figura 1bc).

Os valores da produção acumulada de metano provenientes do co-armazenamento de RFV foram superiores aos obtidos pelo SL, sendo que RFV + BC 5% apresentou a melhor taxa de conversão em metano, com 27% de eficiência quando comparado ao PBM<sub>p</sub>. Em contrapartida, as concentrações dos co-armazenamentos com SL foram ineficientes devido ao elevado valor de pH quando comparado ao RFV, além de apresentar a maior variação de pH e não se manter ácido durante os 7 dias de contato (Figura 2)

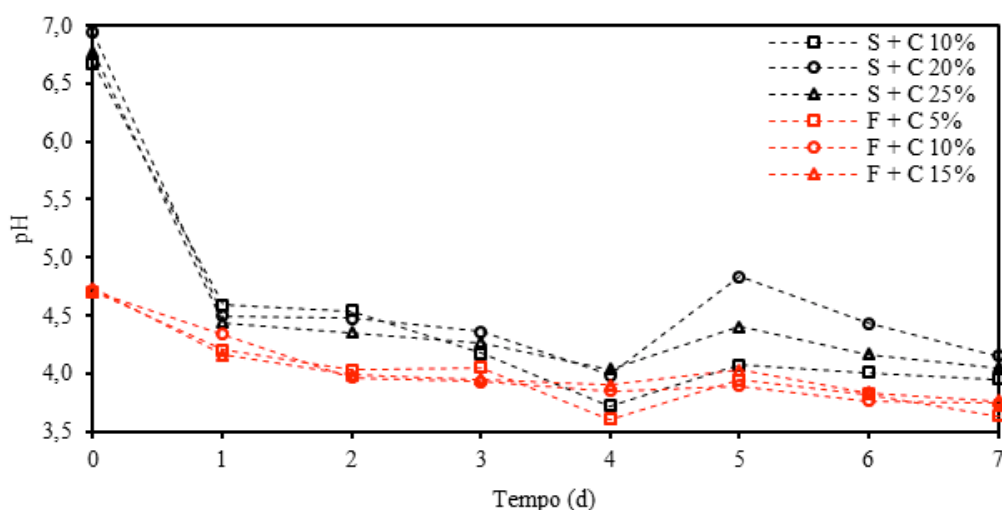


Figura 2 - Comportamento do pH durante o co-armazenamento  
Fonte: Autoria própria

O pH dos co-armazenamentos de SL+BC apresentaram queda brusca no primeiro dia, partindo do pH inicial de 6,89 para 4,43, ou seja, SL teve início em pH neutro e foi acidificando com o tempo, enquanto que o pH inicial de RVF foi de 4,83, ou seja, o pH da fruta apresentou caráter ácido durante os 7 dias de contato, não demonstrando queda abrupta. A média de pH do SL durante todos os dias de co-armazenamento foi superior ao do RVF, sendo que SL também apresentou maior variação do pH, não se mantendo ácido durante os 7 dias de contato.

O pré-tratamento convencional alcalino com NaOH, foi realizado como comparação aos métodos alternativos de pré-tratamento, sendo que os valores de PBM para as concentrações de NaOH 1%, 5% e 10% foram iguais a 223, 298 e 330  $L_N CH_4 kg SV^{-1}$ , respectivamente. O pré-tratamento aplicado apresentou eficiência para as concentrações de 5% (21%) e 10% (34%), já a concentração de NaOH 1% não apresentou eficiência (-9%) quando comparado ao BC 2° teste.

Hipoteticamente, pode-se afirmar que o processo de lavagem para a remoção do efluente gerado no pré-tratamento extraiu compostos solúveis provenientes do ataque químico ao resíduo lignocelulósico, resultando na presença de lignina e celulose remanescentes na fase sólida. Segundo Hendriks & Zeeman (2009), o pré-tratamento pode solubilizar a hemicelulose e parte da lignina, resultando na liberação de compostos solúveis e possível inibição devido a geração de monômeros e ácidos furfúrais, tóxicos ao processo de DA.

Apesar dos pré-tratamentos com NaOH 5% e 10% se mostrarem eficientes em termos de conversão de metano, apresentam gastos com reagentes químicos e a geração de efluente tóxico ao meio ambiente, sendo necessário o gasto com tratamento e disposição final. Neste sentido a eficiência de conversão de metano por massa NaOH adicionado, foi superior para o pré-tratamento a 5% ( $9,9 mL CH_4.gNaOH^{-1}$ ), quando comparado ao NaOH 10% ( $8,0 mL CH_4.gNaOH^{-1}$ ) (Tabela 3).

**Tabela 3 - Parâmetros do processo de DA**

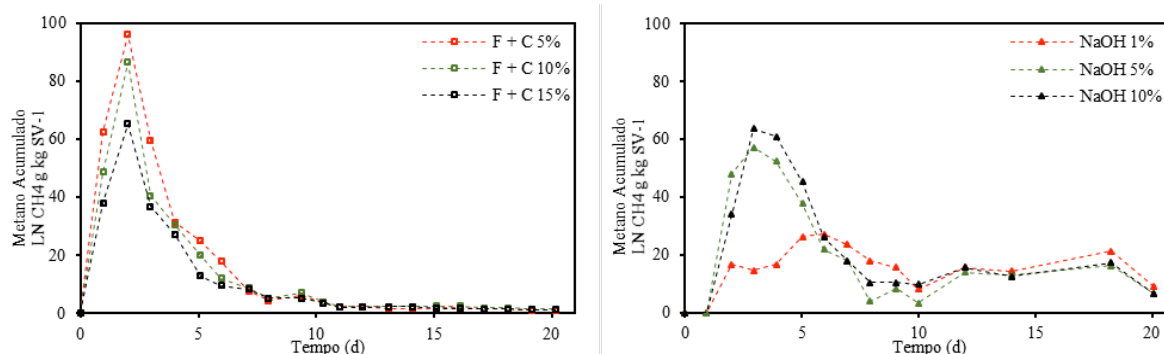
Substrato	pH Médio dos 7 dias	Teor de Metano (%)	PBM ( $L_N CH_4 kg SV^{-1}$ )	PBM Ponderado ( $L_N CH_4 kg SV^{-1}$ )	Eficiência (%)	Eficiência ( $mL CH_4.gNaOH^{-1}$ )
BC	NA	56	330	NA	NA	NA
BC 2° Teste	NA	55	246	NA	NA	NA
RFV	NA	60	423	NA	NA	NA
SL	NA	63	449	NA	NA	NA
SL + BC 10%	4,46 ± 0,94	59	345	409	-13	NA
SL + BC 20%	4,71 ± 0,93	57	338	388	-10	NA
SL + BC 25%	4,56 ± 0,91	57	309	381	-17	NA
RFV + BC 5%	4,00 ± 0,35	63	520	413	27	NA
RFV + BC 10%	4,03 ± 0,33	60	437	402	10	NA
RFV + BC 15%	4,04 ± 0,30	60	383	394	-1	NA
NaOH 1%	NA	55	223	NA	-9	-21,9
NaOH 5%	NA	52	298	NA	21	9,9
NaOH 10%	NA	52	330	NA	34	8,0

NA = Não Aplicável

Fonte: Autoria própria

A produção de metano diária para o co-armazenamento com RFV apresentou comportamento similar para todas as concentrações de 5%, 10% e 15%, com valores máximos de produção no dia dois, no entanto o co-armazenamento a 5% apresentou maior taxa de conversão, com  $96 L_N CH_4.dia^{-1}$ , cerca de 10,42% ( $85 L_N CH_4.dia^{-1}$ ) superior ao co-armazenamento de 10% e 32,29% ( $65 L_N CH_4.dia^{-1}$ ) superior ao de 1%.

Já o pré-tratamento convencional alcalino, apresentou semelhança para as concentrações de 5 e 10%, com produção máxima no dia três de operação, com valores de 57 e 64  $L_N CH_4.dia^{-1}$ , respectivamente. Já o pré-tratamento com NaOH 1%, obteve pico de produção no sexto dia, com  $26 L_N CH_4.dia^{-1}$ , isto se deve possivelmente a lavagem do substrato após o pré-tratamento, que proporcionou a remoção de compostos solúveis, uma vez que o pré-tratamento não foi eficiente, devido à baixa concentração utilizada (Figura 3).



**Figura 3 - Produções diárias de metano do co-armazenamento de RFV, BC e pré-tratamento convencional alcalino com NaOH.**

Fonte: Autoria própria



## 4 CONCLUSÕES

O pré-tratamento convencional alcalino com NaOH é uma alternativa tecnicamente viável na conversão em metano de substratos lignocelulósicos, sendo os pré-tratamentos com NaOH 5% e NaOH 10% mais eficientes em termos de rendimento de metano, com 21% e 34%, respectivamente. No entanto, o pré-tratamento com NaOH 5% apresentou a maior eficiência de produção de metano por massa de reagente químico utilizado, com  $9,9 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{ NaOH}$ , enquanto que NaOH 10%  $8,0 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{ NaOH}$ . Neste sentido, o pré-tratamento convencional demanda gastos com tratamento e disposição final do efluente gerado, além do elevado custo de aquisição de reagentes químicos, não sendo a melhor alternativa para o tratamento de resíduos lignocelulósicos.

Devido a isto, o co-armazenamento é um método atrativo para o pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos. Contudo a eficiência do processo está diretamente relacionada com a variação do pH durante o tempo de contato e com a quantidade de resíduos lignocelulósicos utilizados. Os resultados obtidos indicam que a baixa concentração de resíduos lignocelulósicos proporciona o aumento da superfície de contato com o co-substrato ácido, favorecendo assim o pré-tratamento. O co-armazenamento contendo RFV + BC 5% foi o melhor tratamento, com 27% de eficiência em comparação com o PBM ponderado, enquanto que o pré-tratamento convencional com NaOH 5% apresentou 21%.

Portanto, o pré tratamento a partir do co-armazenamento de resíduos potencialmente ácidos com resíduos lignocelulósicos é uma alternativa tecnicamente viável por aumentar a eficiência da produção de biogás, proporcionar o tratamento de dois substratos contrastantes, além de evitar gastos com reagentes químicos, aquecimento e o tratamento de subprodutos nocivos ao meio ambiente, gerados a partir dos pré-tratamentos convencionais.

## REFERÊNCIAS

ADARME, Oscar F. H.; BAËTA, Bruno E. L.; LIMA, Diego R. S.; GURGEL, Leandro V. A.; AQUINO, Sérgio F. Methane and hydrogen production from anaerobic digestion of soluble fraction obtained by sugarcane bagasse ozonation. **Industrial Crops and Products**, v. 109, n. August, p. 288–299, 2017.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington: American Water Works Association, 2005.

BALAT, Mustafa, BALAT, Havva, ÖZ, Cahide. Progress in bioethanol processing. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, p. 551–573, 2008.

BEHERA, Shuvashish., ARORA, Richa, NANDHAGOPAL, N., KUMAR, Sachin. Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 91–106, 2014.

BERTIN, Lorenzo, GRILLI, Selene, SPAGNI, Alessandro, FAVA, Fabio. Innovative two-stage anaerobic process for effective codigestion of cheese whey and cattle manure. **Bioresource Technology**, v. 128, p. 779–783, 2013.

BLIGH, E. G., DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal of Biochemistry and Physiology**. v. 37, p. 911-917, 1959.

BOLADO-RODRÍGUEZ, Silvia, TOQUERO, Cristina, MARTÍN-JUÁREZ, Judit, TRAVAINI, Rodolfo, GARCÍA-ENCINA, Pedro A. Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 201, p. 182–190, 2016.

EDWIGES, Thiago, FRARE, Laercio, MAYER, Bruna, LINS, Leonardo, MI TRIOLO, Jin, FLOTATS, Xavier, DE MENDONÇA COSTA, Monica S. S. Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, v. 71, p. 618–625, 2018.

Escalante, Humberto, Castro, Liliana, Amaya, M. P., Jaimes, L., & Jaimes-Estévez, J. Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries. **Waste Management**, v. 71, p. 711–718, 2018.

FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food and Nutrition Paper 77: Food Energy (Methods of Analysis and Conversion Factors)**. FAO: 2002.

HENDRIKS, A. T. W. M., ZEEMAN, Grietje. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 10–18, 2009.

HOLLIGER, Christof, ALVES, Madalena, ANDRADE, Diana, ANGELIDAKI, Iriini, ASTALS, Sergi, BAIER, Urs, BOUGRIER, Claire, BUFFIERE, Pierre, CARBALLA, Marta, WILDE, Vinnie, EBERTSEDER, Florian, FERNÁNDEZ, Belén, FICARA, Elena, FOTIDIS, Ioannis, FRIGON, Jean, LACLOS, Helene, GHASIMI, Dara, HACK, Gabrille, HARTEL, Mathias, HEERENKLAGE, Joern, HORVATH, Ilona, JENICEK, Pavel, KOCH, Konrad, KRAUTWALD, Judith, LIZASOAIN, Javier, LIU, Jing, MOSBERGER, Lona, NISTOR, Mihaela, OECHSNER, Hans, OLIVEIRA, João, PATERSON, Mark, PAUSS, André, POMMIER, Sebastien, PORQUEDDU, Isabella, RAPOSO, Francisco, RIBEIRO, Thierry, PFUND, Florian, STROMBERG, Sten, TORRIJOS, Michel, EEKERT, Miriam, LIER, Jules, WEDWITSCHKA, Harald, WIERINCK, Isabella. Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science and Technology**, v. 74, p. 2515–2522, 2016.

JIN, Shuguang; ZHANG, Guangming; ZHANG, Panyue; JIN, Lingyun; FAN, Shiyang; LI, Fan. Comparative study of high-pressure homogenization and alkaline-heat pretreatments for enhancing enzymatic hydrolysis and biogas production of grass clipping. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 104, p. 477–481, 2015.

JOPPERT, Caio. L., DOS SANTOS, Marilyn M., COSTA, Hirdan K. M., DOS SANTOS, Edimilson M., SIMÕES MOREIRA, José R. Energetic shift of sugarcane bagasse using biogas produced from sugarcane vinasse in Brazilian ethanol plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 63–73, 2017.

KAVACIK, B., TOPALOGLU, B. Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, p. 1321–1329, 2010.

KOUPAIE, Hosseini. E., DAHADHA, Samer., BAZYAR LAKEH, Amir A., AZIZI, Armineh, ELBESHISHY, Elsayed. Enzymatic pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production-A review. **Journal of Environmental Management**. 2018.

LARSEN, Soren U., HJORT-GREGERSEN, Kurt, VAZIFEKHORAN, Ali H., TRIOLO, Jin M. Co-ensiling of straw with sugar beet leaves increases the methane yield from straw. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 106–115, 2017.

LI, Yue, CHEN, Yinguang, WU, Jiang. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. **Applied Energy**, v. 240, p. 120–137, 2019.

LIU, Xiaoying, ZICARI, Steven. M., LIU, Guangqing., LI, Yeqing, ZHANG, Ruihong. Improving the bioenergy production from wheat straw with alkaline pretreatment. **Biosystems Engineering**, v. 140, p. 59–66, 2015.

LIU, Yunyun., XU, Jingliang., ZHANG, Yu, YUAN, Zhenhong, HE, Minchao, LIANG, Cuiyi, ZHUANG, Xishu, XIE, Jun. Sequential bioethanol and biogas production from sugarcane bagasse based on high solids fed-batch SSF. **Energy**, v. 90, p.1199–1205, 2015.

NOSRATPOUR, Mohammad J., KARIMI, Keikhosro, SADEGHI, Morteza. Improvement of ethanol and biogas production from sugarcane bagasse using sodium alkaline pretreatments. **Journal of Environmental Management**, v. 226, p. 329–339, 2018.

QIAO, Wei; YAN, Xiuyi; YE, Junhui; SUN, Yifei, WANG, Wei, ZHANG, Zhongzhi. Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. **Renewable Energy**, v. 36, n. 12, p. 3313–3318, 2011.

SAIDU, Mohammed, YUZIR, Ali, SALIM, Mohd R., SALMIATI, AZMAN, Shamila, ABDULLAH, Norhayati. Biological pre-treated oil palm mesocarp fibre with cattle manure for biogas production by anaerobic digestion during acclimatization phase. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 95, p. 189–194, 2014.

SHEN, Shaoshuan.; NGES, Ivo A., YUN, Junxian; LIU, Jing. Pre-treatments for enhanced biochemical methane potential of bamboo waste. **Chemical Engineering Journal**, v. 240, p. 253–259, 2014.

SINGH, Joginder, SUHAG, Meenakshi, DHAKA, Anil. Augmented digestion of lignocellulose by steam explosion, acid and alkaline pretreatment methods: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 117, p. 624–631, 2015.

THOMPSON, D.N., BARNES, J.M., HOUGHTON, T.P. Effect of additions on ensiling and microbial community of senesced wheat straw. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 121, p. 21–46, 2005.

VATS, Neelam, KHAN, Abid A., AHMAD, Kafeel. Effect of substrate ratio on biogas yield for anaerobic co-digestion of fruit vegetable waste & sugarcane bagasse. **Environmental Technology & Innovation**, v. 13, p. 331–339, 2019.

VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI 4630: Fermentation of organic materials Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Düsseldorf, 2006.

WANG, Long, SHEN, Fei, YUAN, Hairong, ZOU, Dexun, LIU, Yanping, ZHU, Baonig, LI, Xiujing. Anaerobic co-digestion of kitchen waste and fruit/vegetable waste: Lab-scale and pilot-scale studies. **Waste Management**, v. 34, p. 2627–2633, 2014.

YU, Q., LIU, R., LI, K., MA, R. A review of crop straw pretreatment methods for biogas production by anaerobic digestion in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 51–58, 2019.

ZHANG, Shujing, KESHWANI, Deepak R., XU, Yixiang, HANNA, Milford. A. Alkali combined extrusion pretreatment of corn stover to enhance enzyme saccharification. **Industrial Crops and Products**, v. 37, p.352–357, 2012.

ZHENG, Yi, ZHAO, Jia, XU, Fuqing, LI, Yebo. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 42, p. 35–53, 2014.