

XI-265 – GERAÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO ATRAVÉS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE CASCA DE LARANJA EM DIFERENTES FORMATOS

María Teresa de Jesus Camelo Guedes⁽¹⁾; Marcos Henrique Gomes Ribeiro⁽²⁾; Ian Rocha de Almeida⁽³⁾; Clara Bravim Zile⁽⁴⁾; Maria Cristina de Almeida Silva⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Engenheira Civil pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). E-mail: mteresag1308@gmail.com

⁽²⁾ Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestre em Engenharia Civil (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) pela UFPE. Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental no IPH/UFRGS. E-mail: mhgribeiro@ufrgs.br

⁽³⁾ Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Mestre e Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo IPH/UFRGS. E-mail: ianrochalmeida@gmail.com

⁽⁴⁾ Graduada em Engenharia Ambiental no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). E-mail: clarabravimzile@gmail.com

⁽⁵⁾ Engenheira de Biotecnologia e Bioprocessos pela Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). Mestre e Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Professora Adjunta do Departamento de Obras Hidráulicas do IPH/UFRGS. E-mail: maria.almeida@ufrgs.br

Endereço^(1,2,3,4,5): Avenida Bento Gonçalves, 9500, Prédio 44302, Agronomia – Porto Alegre – Rio Grande do Sul – RS – CEP: 91501-970 - Brasil

RESUMO

O Brasil se destaca como o maior produtor de laranjas do mundo e, durante o processo de fabricação dos sucos, cerca de 50 a 60% da fruta é transformado em resíduos que, a depender da destinação, podem causar impactos ambientais. Uma opção para valorização dos resíduos de casca de laranja (RCL) é o seu emprego na digestão anaeróbia (DA), processo capaz de gerar biogás e biometano, que podem ser usados para geração de energia. Assim, o país possui grande potencial para produção de biogás e biometano através do reaproveitamento dos resíduos de laranja. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo comparar a geração de biogás e biometano na digestão anaeróbia de RCL em diferentes formatos (suco e em pedaços triturados). Para isso, foi realizado experimento em um sistema com reatores batelada, atendendo às diretrizes da norma alemã VDI 4630, operando em temperatura mesofílica (35 °C), por um período de 21 dias. Os volumes de biogás e de biometano acumulados nos reatores com RCL em pedaços foram cerca de 160% e 250%, respectivamente, maiores em relação aos reatores com RCL em suco. Em relação aos rendimentos específicos de biometano e de biogás encontrados para ambas as configurações, obtiveram-se valores inferiores aos apresentados em demais estudos na literatura. Apesar disso, verifica-se que a utilização de RCL em digestão anaeróbia pode ser viável, adotando-se medidas que permitam um processo anaeróbio estável, e contribuindo para o aproveitamento de resíduos e conseqüentemente, a geração de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Biometano, Resíduo, Casca de Laranja, Digestão Anaeróbia.

INTRODUÇÃO

A laranja é uma das frutas mais cultivadas mundialmente, sendo utilizada para obter produtos como sucos, óleos essenciais e geleias (CAMARGO et al., 2021). Estima-se que, no processo de fabricação dos sucos, 50 a 60% da fruta é transformada em resíduo, composto pela casca, sementes e bagaço (MARTÍN et al., 2013). Esses resíduos são, normalmente, destinados para aterros sanitários, compostagem ou aproveitados para alimentação animal (ORTIZ et al., 2020). Entretanto, diversas destinações podem causar impactos ambientais, como emissões de líquidos para o solo e problemas de odor (JIMÉNEZ-CASTRO et al., 2020).

Uma opção promissora para valorização dos resíduos de casca de laranja (RCL) é o seu emprego como substrato na digestão anaeróbia (DA), processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio através de quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHERNICHARO, 2016). Nesse processo, grupos distintos de microrganismos degradam compostos orgânicos complexos em produtos mais simples (SILVA et al., 2018), como o biogás e o biometano, que podem ser usados para geração de calor ou energia (JIMÉNEZ-CASTRO et al., 2020).

Os RCL apresentam particularidades que podem dificultar o processo anaeróbio, como pH ácido (3-5) e alto teor de óleo essencial (OE), composto principalmente por D-limoneno (83-97%) (BICAS et al., 2008), conhecido por ser obstáculo para a DA, em virtude de ser tóxico para os microrganismos. Apesar disso, a utilização de RCL na DA é viável e alguns estudos têm apresentado resultados promissores (MARTÍN et al. 2013; ZEMA et al., 2018; JIMÉNEZ-CASTRO et al., 2020; CAMARGO et al., 2021).

O Brasil se destaca como o maior produtor de laranjas do mundo, sendo responsável por 35% de toda produção global (JIMÉNEZ-CASTRO et al., 2020). Assim, o país possui expressivo potencial para produção de biogás e biometano através do reaproveitamento dos resíduos de laranja.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo comparar a geração de biogás e biometano na digestão anaeróbia de RCL em diferentes formatos (suco e em pedaços triturados). Foi usado sistema de reatores em batelada, em temperatura mesofílica, e seguidas as recomendações da norma alemã VDI 4630.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para comparar a geração de biogás e de biometano, foi realizado experimento em triplicata em um sistema com reatores batelada, operando em temperatura mesofílica (35 °C), por um período de 21 dias. O sistema atendeu às diretrizes da norma alemã VDI 4630 (2006) e foi composto por reatores de 300 mL preenchidos com os conteúdos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Composição dos reatores no procedimento experimental.

Reator	Triplicata	Inóculo (g)	Açúcar (g)	RCL (g)	NaHCO ₃ (g)
R0 – R2	1	200	-	-	6,2
R3 – R5	2	200	7,5	-	14,6
R6 – R8 (Suco)	3	195	-	4,95	6,1
R9 – R11 (Pedaços)	4	195	-	4,95	6,1

Os resíduos de casca de laranja (RCL) foram obtidos de consumação própria, armazenados em freezer (-20 °C) até o uso e posteriormente, foram triturados em liquidificador. O inóculo utilizado foi proveniente do reator UASB de uma indústria alimentícia e introduzido ao reator para proporcionar a comunidade microbiana necessária para dar início ao processo (SOUZA et al., 2020). Foi adicionado alcalinizante (NaHCO₃) aos reatores para evitar a acidificação e manter o pH na faixa neutra (7-8). Além disso, a sacarose (açúcar cristal comercial) foi utilizada para referência dos demais reatores, por ser considerada matéria orgânica de fácil biodegradação.

O suco dos RCL foi preparado com 5g de casca de laranja e 50 mL de água deionizada em um liquidificador, para formar uma mistura homogênea, seguindo metodologia APHA (2012), que apresenta preparo para amostras sólidas. Já os RCL em pedaços foram triturados em liquidificador, com pedaços maiores sendo removidos manualmente e reprocessados.

SISTEMA EXPERIMENTAL

No sistema, apresentado na Figura 1, os reatores (2) foram vedados com uma tampa de borracha (3), para permitir a coleta de gás com uma seringa, e ligados através de uma mangueira (5) a frascos Boyle-Mariotte (6), preenchidos com água. Conforme o gás foi produzido, a água do frasco foi transferida para um béquer (7), sendo possível medir o volume deslocado e a partir deste, inferir a geração de gás. O conteúdo dos reatores foi mantido em agitação contínua, através de uma bandeja agitadora (1), para proporcionar melhor contato entre

os substratos e inóculo e ficaram em ambiente com temperatura controlada por termostato (4), em temperatura mesofílica (35 °C).

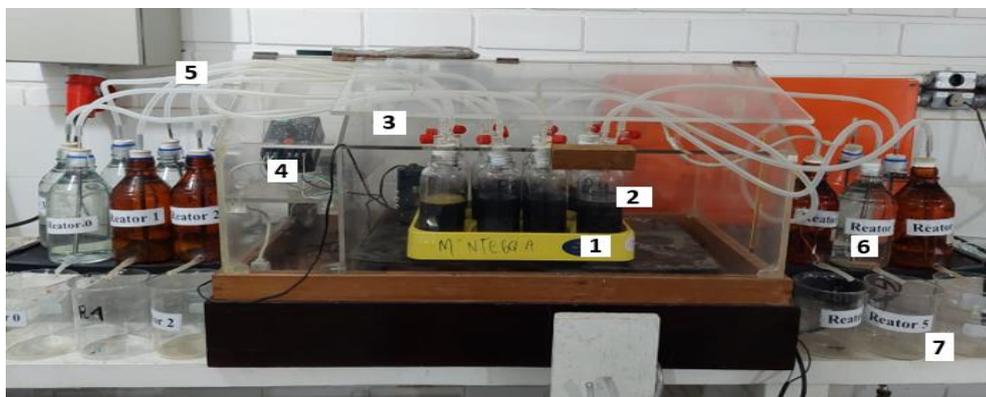


Figura 1: Design experimental do sistema utilizado no estudo.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

Para caracterizar o substrato e inóculo utilizados, foram realizadas as seguintes análises em triplicatas e apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Parâmetros físico-químicos utilizados na caracterização dos substratos e inóculo do sistema experimental.

Parâmetro	Referência
pH	4500+H- APHA (2012)
Sólidos Totais (mg/L)	2540B APHA (2012)
DQO (mg/L)	5220C APHA (2012)
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	RIPLEY et al. (1986)
D-limoneno (%)	Scott & Veldhuis (1966)

Os RCL para serem caracterizados foram preparados seguindo metodologia APHA (2012), que apresenta o preparo para amostras sólidas. Uma mistura de 5g de casca de laranja e 50 mL de água deionizada foi agitada em shaker à 25 °C, 200 rpm por 1 hora. Após isso, o conteúdo foi filtrado em papel filtro com porosidade 0,45 µm, com bomba a vácuo. Além da caracterização dos substratos e inóculo, determinou-se o pH do afluente e do efluente dos reatores (APHA, 2012).

COMPOSIÇÃO E QUALIDADE DO BIOGÁS

A composição e a qualidade do biogás foram determinadas cinco vezes por semana através de cromatografia gasosa utilizando cromatógrafo DANI GC1000 com detector de condutividade térmica (DCT) e coluna capilar SUPELCO Carboxen- 54 1006 PLOT.

Os volumes de biogás e de biometano foram normalizados às condições pré-definidas de temperatura e pressão (273 K e 1013 hPa), para quantificação e posterior comparação de resultados de demais estudos (EMBRAPA, 2016), de acordo com a Equação 1, apresentado na norma VDI 4630 (2016).

$$V_N = V \cdot \frac{(P - P_W) \cdot T_N}{P_N \cdot T} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

VN: Volume seco de biogás normalizado (NmL ou STP mL)

V: Volume de biogás produzido (mL)

P: Pressão do biogás no dia da leitura ou medição (hPa)

PW: Pressão de vapor da água em função da temperatura ambiente (hPa)

TN: Temperatura normal (273 K)

PN: Pressão normal (1013 hPa)

T: Temperatura do experimento (K)

Para calcular a pressão do vapor de água, em função da temperatura ambiente, foi utilizada a equação modificada de Buck (1996) (Equação 2):

$$P_W = 6,1121 \cdot e^{\left((18,678 - \frac{T_C}{234,5}) \frac{T_C}{257,14 + T_C} \right)} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

PW: Pressão de vapor da água em função da temperatura ambiente em hPa (1 hPa = 0,1 kPa)

TC: Temperatura ambiente do experimento (°C)

Além de normalizar os volumes de biogás e biometano, determinou-se a produção bruta de biogás e de biometano acumulados ao longo do tempo experimental, bem como o rendimento específico de metano (Y_{CH_4}), definido como a quantidade de metano diária ou acumulada dividido pela massa de substrato utilizada, expresso em NmL CH_4/g SV.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foi realizada análise descritiva dos dados obtidos, sendo os resultados apresentados como média e desvio padrão em todas as amostras, realizadas através do Software Microsoft Excel.

RESULTADOS

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

Os resultados referentes à caracterização física e química dos RCL e do inóculo utilizados podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização físico-química do inóculo e substrato utilizados.

Parâmetro	Inóculo	RCL
pH	7,18 ± 0,02	4,28 ± 0,03
Sólidos Totais (%)	12,00 ± 4,56	17,93 ± 0,27
Sólidos Voláteis (g%)	8,07 ± 3,21	17,25 ± 0,35
Sólidos Fixos (%)	3,94 ± 1,37	0,67 ± 0,08
DQO (g/L)	186,90 +55,80	539,93 ± 83,07
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	7.472,53 ± 0,00	2.124,53 ± 253,77
D-limoneno (%)	-	0,18 ± 0,00

O pH dos RCL na faixa ácida (4,28 ± 0,03) é um desafio para digestão anaeróbia. Entretanto, a escolha do inóculo com elevada alcalinidade e pH na faixa neutra pode ajudar a neutralização da acidez da casca de laranja, ajudando a manter um pH adequado para o crescimento microbiano.

PRODUÇÃO DE BIOGÁS E DE BIOMETANO

Após normalizar os volumes às condições pré-definidas de temperatura e pressão (273 K e 1013 hPa), foi possível determinar os volumes acumulados de biogás e biometano, durante o período de incubação de 21 dias, apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

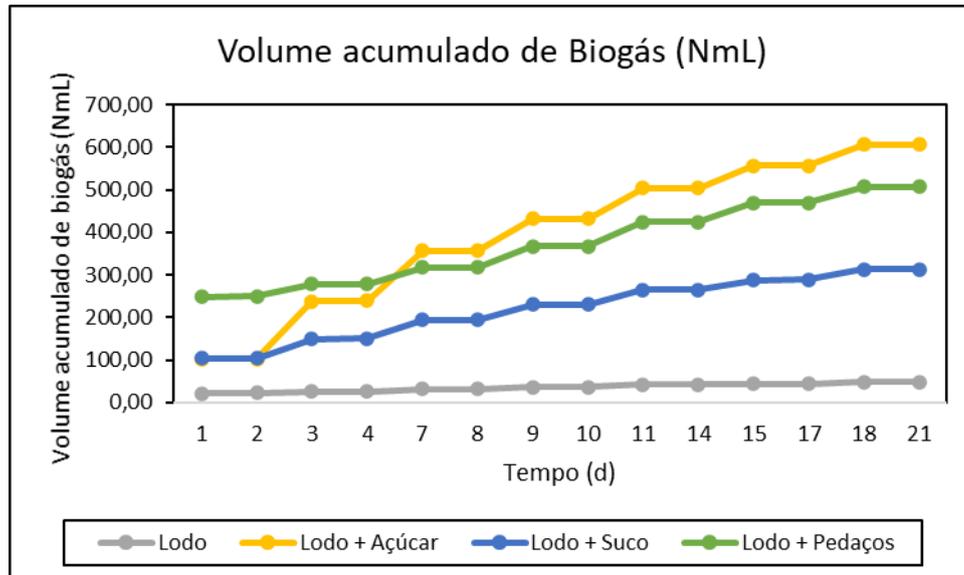


Figura 2: Volume de biogás acumulado (NmL) nas configurações testadas.

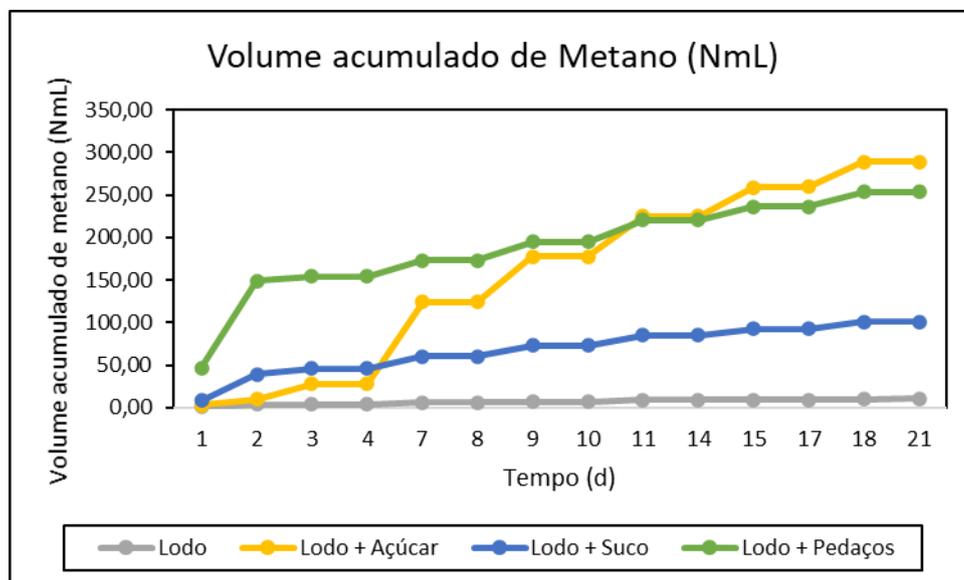


Figura 3: Volume de metano acumulado (NmL) nas configurações testadas.

Pode-se observar que nas curvas médias de volumes acumulados, para todas as configurações experimentais, com exceção dos reatores contendo apenas lodo, em torno do 10º dia transcorrido o experimento mais de 70% do total de biogás já havia sido produzido, diminuindo gradativamente até cessar a produção.

Percebe-se que, nos primeiros 10 dias de incubação, a configuração com RCL em pedaços gerou maiores volumes de biometano, em relação às demais triplicatas (Figura 2). Além disso, verifica-se baixa eficiência de geração de biogás e biometano dos reatores alimentados com RCL em suco, quando comparados com os reatores com a casca em pedaços.

Na Figura 4 são apresentados os volumes de biogás e biometano produzidos durante o período experimental em todas as amostras avaliadas. Destaca-se o volume gerado pela triplicata de RCL em pedaços que gerou 1.045 % a mais de biogás e 2.460 % a mais de metano em comparação a triplicata contendo apenas lodo (Triplicata 1).

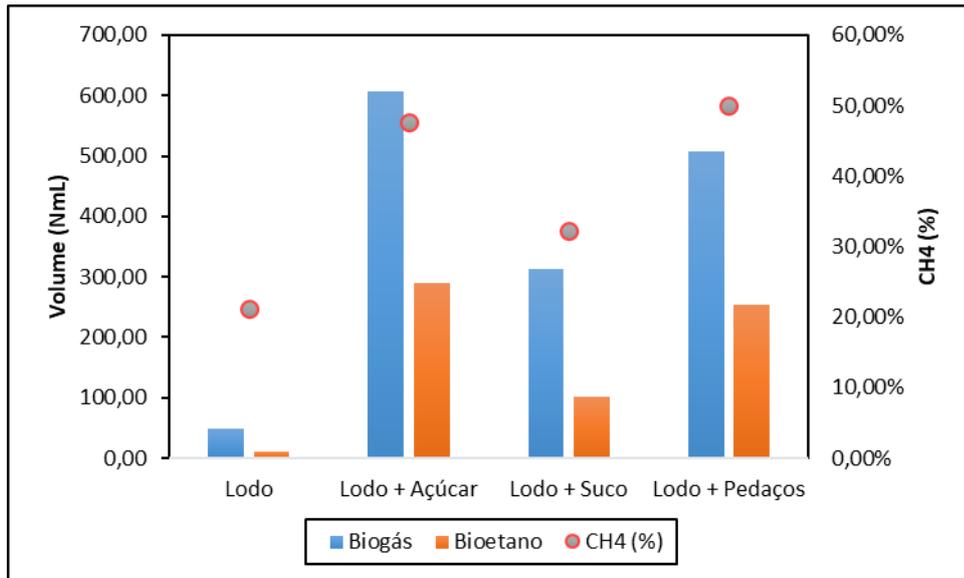


Figura 4: Produção cumulativa de biogás e biometano e porcentagem de metano nas amostras avaliadas (Biometano e biogás são lidos no eixo do lado esquerdo, enquanto CH₄ no eixo do lado direito).

Considerando o valor médio das configurações experimentais utilizadas (triplicatas), a configuração de reatores contendo apenas Lodo apresentou os volumes acumulados mais baixos de biogás e biometano, 48,58 NmL e 10,31 NmL, respectivamente, representando cerca de apenas 21% de CH₄ no biogás. O baixo volume dos gases obtidos está relacionado com a disponibilidade limitada de matéria orgânica presente nos reatores, uma vez que nessa configuração, não se adicionou substratos, além do baixo teor de sólidos totais (ST) do inóculo utilizado.

Já a configuração de Lodo e açúcar, apresentou os volumes acumulados mais altos de biogás e de biometano, de 607,35 NmL e 288,97 NmL, respectivamente, com cerca de 47% de CH₄ no biogás. O açúcar é um substrato de fácil biodegradação e consegue ser prontamente consumido pelos microrganismos presentes.

Em relação às configurações contendo os RCL, verifica-se que o conteúdo composto por RCL em pedaços apresentou volumes acumulados de 507,75 NmL de biogás e 253,75 NmL de biometano. Os volumes acumulados para os reatores com RCL em suco foram 313,91 NmL de biogás e 101,33 NmL de biometano. Assim, percebe-se que os volumes de biogás e de biometano acumulados nos reatores com RCL em pedaços foram cerca de 160% e 250%, respectivamente, maiores em relação aos reatores com RCL em suco.

Em termos de produção de metano, observou-se que a configuração com RCL em pedaços apresentou 50% de volume de metano na amostra de biogás. Estudos utilizando resíduos de casca de laranja e lodo industrial em temperatura mesofílica obtiveram resultados próximos em relação ao rendimento de metano no biogás. No estudo de Santos et al. (2018) o valor encontrado foi ligeiramente maior, de 54,9%. Já Ruiz e Flotats (2016) obtiveram percentagem de metano inferior, igual a 43%.

Ao comparar a configuração de RCL em suco com a configuração de RCL em pedaços, percebe-se que os reatores com suco apresentaram percentual inferior, com cerca de 30% de metano na amostra de biogás.

RENDIMENTO ESPECÍFICO DE BIOGÁS E BIOMETANO

Em termos de potencial de geração de biogás e metano a configuração de RCL em pedaços apresentou potencial de geração de 48,40 NmL/gSV de biogás e 24,19 NmL/gSV de metano. Já para configuração de RCL em suco, os valores foram de 29,92 NmL/gSV e 9,66 NmL/gSV de biogás e biometano, respectivamente.

No estudo de Martín et al. (2010), em que foram utilizadas cascas de laranja pré-tratadas com destilação a vapor e lodo industrial, em condições mesofílicas, o rendimento específico de metano encontrado foi superior de 230 NmL/gSV. Carvalho et al. (2017), ao utilizarem casca de laranja pré-tratada com adição de lodo, obtiveram rendimento específico de biogás elevados de 478 NmL/gSV, em condições mesofílicas. Além desses estudos, Santos et al. (2018), ao utilizarem cascas de laranja e lodo industrial em temperatura mesofílica, obtiveram potencial de geração de 288,0 NmL/gSSV de biogás e 85,9 NmL/gSSV de biometano.

Através do estudo, verifica-se que a geração de biogás e biometano de RCL em pedaços é mais elevada do que no formato de suco. Hipotetiza-se que esses resíduos, ao serem inseridos na forma de suco nos reatores, proporcionem a liberação de D-limoneno ao meio mais facilmente devido à maior quebra física das células, prejudicando os microrganismos presentes e, conseqüentemente, gerando instabilidade para o sistema.

Além disso, apesar da triplicata de RCL em pedaços ter se sobressaído em relação à triplicata de RCL em suco, verifica-se que os rendimentos específicos de metano e de biogás encontrados são expressivamente inferiores aos apresentados em demais estudos na literatura.

Um dos fatores que pode ter influenciado no processo anaeróbio do estudo, foi a baixa quantidade de matéria orgânica nos reatores e o teor de alcalinizante adicionado no início da batelada, elevando o pH do meio, que é um dos fatores de influência na atividade anaeróbia. Na Figura 5 é apresentado o pH inicial e final das configurações dos reatores.

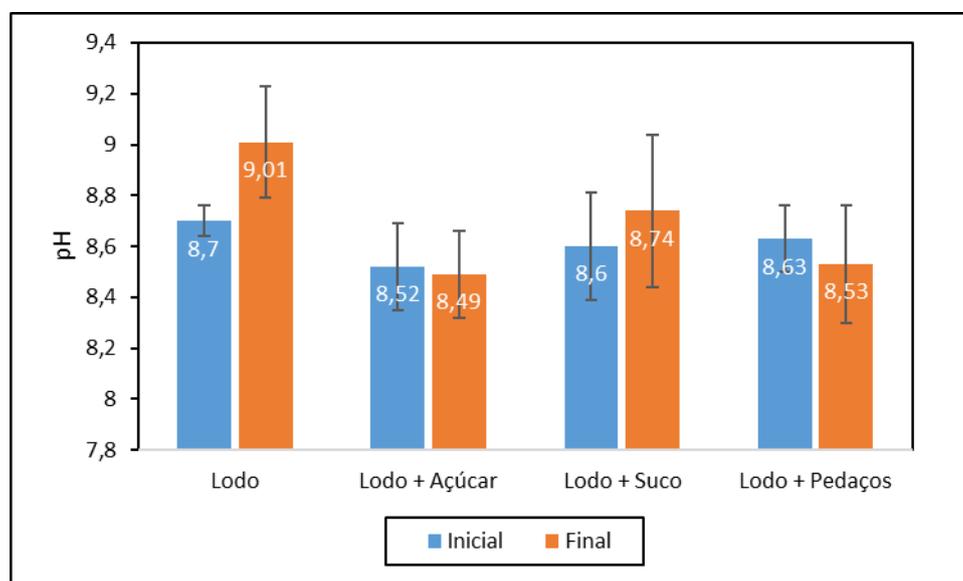


Figura 5: pH no início e no fim do procedimento experimental.

O pH é um parâmetro fundamental no controle do processo anaeróbio. Valores elevados de pH reduzem a atividade metanogênica causando falhas no processo, sendo a faixa ideal entre 6,5 e 7,5 (CHERNICHARO, 2016). Ao avaliar os dados da Figura 5, percebe-se que tanto o pH inicial como final para todas as configurações encontram-se acima da faixa ideal para desenvolvimento dos microrganismos metanogênicos, prejudicando a atividade microbiana e conseqüentemente, a geração de biogás e biometano.

Apesar disso, a utilização de RCL em digestão anaeróbia pode ser viável, contribuindo para o aproveitamento desses resíduos e conseqüentemente, para geração de energia. Para estudos futuros, recomenda-se adotar medidas

que permitam um processo anaeróbio estável, como quantidade adequada de alcalinizante e inóculo com maior teor de sólidos totais (ST).

CONCLUSÕES

Após avaliação do procedimento experimental, foi possível comparar a geração de biogás e biometano na digestão anaeróbia de RCL em formato de suco e em pedaços triturados. Verificou-se que os volumes de biogás e de biometano acumulados nos reatores com RCL em pedaços foram cerca de 162% e 250%, respectivamente, maiores em relação aos reatores com RCL em suco. Levanta-se a hipótese de que isso esteja associado à liberação facilitada de D-limoneno ao meio devido à maior quebra física das células dos RCL no formato de suco.

Além disso, em termos de potencial de geração de biogás e metano a configuração de RCL em pedaços apresentou potencial de geração de 48,40 NmL/gSV de biogás e 24,19 NmL/gSV de metano. Já para configuração de RCL em suco, os valores foram de 29,92 NmL/gSV e 9,66 NmL/gSV de biogás e biometano, respectivamente. Percebe-se que os valores obtidos são inferiores aos apresentados em demais estudos na literatura (MARTÍN et al., 2010; CARVALHO et al., 2017; SANTOS et al., 2018).

Os baixos volumes de biogás e biometano podem ser explicados pela baixa quantidade de matéria orgânica nos reatores e o teor de alcalinizante adicionado no início da batelada, elevando o pH do meio, que se encontrou acima da faixa ideal tanto no início como no fim da batelada.

Apesar disso, verifica-se que a utilização de RCL em digestão anaeróbia pode ser viável, de modo a contribuir para o aproveitamento de resíduos e geração de energia. Para estudos futuros, recomenda-se a adoção de medidas que permitam um processo anaeróbio estável, como controle de pH, alcalinidade e teor de sólidos, para favorecer a maximização da produção de biogás e biometano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22th Ed., APHA/AWWA/WEF, 2012.
2. BICAS, J. L.; FONTANILLE, P.; PASTORE, G. M.; LARROCHE, C. Characterization of monoterpene biotransformation in two pseudomonads. *Journal of Applied Microbiology*, v. 105, n. 6, p. 1991–2001, dez. 2008.
3. BUCK AL (1996) Buck Research Manual.
4. CAMARGO, F. P.; SAKAMOTO, I. K.; DUARTE, I. C. S.; SILVA, E. L.; VARESCHE, M. B. A. Metataxonomic characterization of bacterial and archaeal community involved in hydrogen and methane production from citrus peel waste (*Citrus sinensis* L. Osbeck) in batch reactors. *Biomass and Bioenergy*, v. 149, 2021.
5. CHERNICHARO, C. A. de L. Reatores Anaeróbios – Princípios de Tratamento biológico de águas residuárias. 2ª ed, Belo Horizonte – MG. Editora UFMG, 2016.
6. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Padronização de uso das unidades de medida em processos de produção de biogás. Comunicado Técnico. ISSN 0100-8862 Versão Eletrônica. Concórdia - SC, outubro, 2016.
7. JIMÉNEZ-CASTRO, M.P.; BULLERA, L. S.; ZOFFREOB, A.; TIMBOK, M. T.; FORSTERCARNEIRO, T. Two-stage anaerobic digestion of orange peel without pre-treatment: Experimental evaluation and application to São Paulo state. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, agosto 2020.
8. MARTÍN, M. A.; FÉRNANDEZ, R.; SERRANO, A.; SILES, J. A. Semi-continuous anaerobic co-digestion of orange peel waste and residual glycerol derived from biodiesel manufacturing. *Waste Management*, v. 33, p. 1633-1639, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.027>.
9. ORTIZ, D. L.; BATUECAS, E.; ORREGO, C. E.; RODRIGUÉZ, L. J.; CAMELIN, E.; FINO, D. Sustainable management of peel waste in the small-scale orange juice industries: A Colombian case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 265, 2020.
10. RUIZ, B.; FLOTATS, X. Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste. *Journal Biochemical Engineering*, v. 109, p. 9-18, 2016.
11. SANTOS, L.A.; SANTOS, A. F. M. S.; VALENÇA, R. B.; JUCÁ, J. F. T.; OLIVEIRA, C. R. M. Produção de biogás a partir do bagaço da laranja. *Geamã – Ciências ambientais e biotecnologia*, v.4, n. 2, p. 22-27, set., 2018.

12. SCOTT, W.C., VELDHUIS, M.K. Rapid estimation of recoverable oil in citrus juices by bromate titration. *J. Assoc. Off. Agric. Chem. Int.*, v. 49, p.628–633, 1966.
13. SILVA, F.M.S.; MAHLER, C.F.; OLIVEIRA, L.B.; BASSIN, J.P. Hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion system by co-digestion of food waste, sewage sludge and glycerol. *Waste Management*, v. 76, p.339–349, 2018.
14. SOUZA, F. M.; VIANA, E.; JAEGER, J. M. S.; CANDIANI, G.; SIMÕES, A. F.; FONSECA FILHO, H. Influência do inóculo na co-digestão anaeróbia de resíduos alimentares e grama. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.11, n.1, p.146-156, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.001.0014>. Acesso em: 25 ago. 2021.
15. VEREINDEUTSCHER INGENIEURE - VDI 4630. Fermentation of organic materials: Chacacterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Normas Técnicas da Associação Alemã de Engenheiros. Germany, 2006.
16. ZEMA, D. A. FÓLINO, A.; ZAPPÍA, G.; CALABRÓ, P. S.; TAMBURINO, V.; ZIMBONE, S. M. Anaerobic digestion of orange peel in a semi-continuous pilot plant: An environmentally sound way of citrus waste management in agro-ecosystems. *Science of the Total Environment*, v. 630 p. 601-608, 2018.