

II-439 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA ÁGUA RESIDUÁRIA DO BENEFICIAMENTO DE FRUTOS DA INDÚSTRIA DE SORVETES

Erlon Lopes Pereira

Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Mestre em Biotecnologia Industrial/Microbiologia Aplicada pela Universidade de São Paulo (USP) – Escola de Engenharia de Lorena (EEL). Doutor em Engenharia Agrícola/Recursos Hídricos e Ambientais pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Naassom Wagner Sales Morais

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutorando em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Milena Maciel Holanda Coelho

Graduanda em Biotecnologia pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Renato Carrhá Leitão

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Doutor em Environmental Sciences pela Wageningen University & Research (WUR, Holanda).

André Bezerra dos Santos ⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Especialista em Ecological Sanitation pelo Stockholm Environment Institute (SEI, Suécia). Mestre em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutor em Environmental Sciences pela Wageningen University & Research (WUR, Holanda).

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici, Bloco 713, Pici - Fortaleza- CE - CEP: 60455-900 - Brasil - Tel: (85) 3366-9490 - e-mail: andre23@ufc.br

RESUMO

O aproveitamento de resíduos agroindustriais para a prospecção de bioenergia por vias biotecnológicas exerce um papel importante no desenvolvimento de uma matriz energética ambientalmente viável. O metano (CH₄) produzido no biogás a partir da digestão anaeróbia é um dos compostos passíveis de serem utilizados para a geração de eletricidade e calor. Dentre os resíduos agroindustriais que podem ser aproveitados, pode-se destacar as águas residuárias do beneficiamento de frutos (ARBF) da indústria de sorvetes, composta por quantidades consideráveis de matéria orgânica, o que a torna potencialmente poluidora ao meio ambiente. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de produção de biogás (metano) a partir da digestão anaeróbia da ARBF da indústria de sorvetes. Para isso, foram utilizados três reatores batelada com volume reacional e *headspace* de 50 e 60 mL, respectivamente. Os reatores foram inoculados com lodo anaeróbio sanitário e a relação alimento/microrganismo (A/M) foi de $0,60 \pm 0,02$ g DQO·g SSV⁻¹. Posteriormente, foram incubados em *shaker* sob agitação orbital de 150 rpm e temperatura de 35 °C durante 35 dias. Ao longo do experimento, as pressões foram determinadas e, ao final, foram realizadas análises de cromatografia gasosa, de cromatografia líquida e de Demanda Química de Oxigênio (DQO) para fins de balanço de massa. A modelagem cinética da produção de CH₄ foi realizada por meio da equação modificada de Gompertz, visando o levantamento de parâmetros cinéticos que auxiliem o projeto de biorreatores anaeróbios. Os biorreatores apresentaram produção biogás com média de 83,7% v/v de CH₄. O modelo modificado de Gompertz se ajustou aos dados experimentais de forma estatisticamente significativa ($R^2 = 0,98$), permitindo auxiliar na definição de parâmetros importantes ao projeto e operação do bioprocessos. Os resultados sugerem que a ARBF é um substrato viável para ser utilizado na prospecção de biogás, com potencial de purificação de CH₄ com bom custo-benefício.

PALAVRAS-CHAVES: Sustentabilidade na Agroindústria, Modelo de Gompertz, Bioenergia.

INTRODUÇÃO

A transformação de resíduos agroindustriais em produtos de valor agregado a partir da digestão anaeróbia da matéria orgânica é uma das estratégias mais atraentes para atender à necessidade crescente de fontes de energias renováveis e para reduzir emissões de gases de efeito estufa provenientes da exploração de combustíveis fósseis (DOLLHOFER *et al.*, 2018). Um dos produtos de maior valor agregado é o metano presente no biogás, o qual pode ser utilizado para geração de eletricidade, de calor, de vapor, como combustível veicular e para injeção na rede de gás natural para uso doméstico ou industrial (KHAN *et al.*, 2017).

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), o biogás foi a terceira fonte de energia renovável com maior taxa de crescimento anual no período de 1990-2015, correspondendo a um aumento de 12,8% a.a. No Brasil, a participação do biogás na matriz energética ainda pode ser considerada incipiente. Apesar disso, essa participação passou de 0,01% em 2010 para 0,05% em 2016, estimando-se que a capacidade instalada de biogás para geração elétrica tenha sido de 119 MW no ano de 2016 (MILANEZ *et al.*, 2018).

No contexto da produção do biogás em grande escala, os resíduos agroindustriais se constituem como alternativas viáveis para redução de custos devido a sua abundância e baixo valor agregado. Dentre estes, as águas residuárias de indústrias de alimentos e de bebidas podem ser destacadas, as quais representam um desafio em relação ao seu gerenciamento adequado devido à elevada concentração de matéria orgânica e de nutrientes (MILANEZ *et al.*, 2018; ZHAO *et al.*, 2018).

Nesse contexto, a água residuária do beneficiamento de frutas (ARBF), produzida durante a lavagem e despolpamento de frutas para fabricação de sorvetes, é um resíduo da indústria de sorvetes e de derivados, caracterizando-se por ser uma mistura coloidal complexa de sólidos suspensos (compostos aromatizantes) e de moléculas solúveis (carboidratos, proteínas do leite e de outras fontes, lipídios e minerais), os quais contribuem para sua elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Além disso, esse tipo de água residuária pode ainda conter resíduos de detergentes e desinfetantes, contribuindo tanto para a DBO quanto para sua complexidade de tratamento e diminuição da biodegradabilidade (DEMIREL *et al.*, 2013).

Durante a fabricação de sorvetes, estima-se que a quantidade de efluentes gerada varie entre 3,0 a 7,0 L por 0,45 kg de produto, evidenciando o seu potencial poluidor. Dependendo do processamento, do tipo de sorvete, dos equipamentos utilizados e dos protocolos de fabricação e de limpeza, pode haver extrema variação de suas características físico-químicas (ENTESHARI; MARTÍNEZ-MONTEAGUDO, 2018; VILELA, 2012). Por esses motivos, faz-se necessário o tratamento adequado desse tipo de água residuária no intuito de mitigar os impactos ambientais que podem ser ocasionados pela sua disposição no meio ambiente.

Nesse contexto, também se faz importante tanto se conhecer a biodegradabilidade anaeróbia do referido resíduos, quanto realizar um estudo cinético da produção de metano a partir da ARBF, visando a escolha adequada de um modelo matemático que possa prever o comportamento de biorreatores em diferentes condições operacionais em um tempo mais curto do que a experimentação a longo prazo, fornecendo subsídio experimental para o projeto e a operação de reatores.

OBJETIVO

Avaliar o potencial de produção de biogás (metano) a partir da digestão anaeróbia da água residuária do beneficiamento de frutas da indústria de sorvetes.

METODOLOGIA

A água residuária de beneficiamento de frutos (ARBF) foi obtida de uma indústria de sorvetes localizada no município de Eusébio, Ceará, Brasil. A ARBF foi caracterizada conforme *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Para avaliar o potencial de produção de biogás (metano) a partir da ARBF, foram utilizados três reatores batelada, dois controles químicos (sem o inóculo) e dois controles endógenos (sem o substrato), todos em borossilicato. Cada frasco possuía um volume reacional de 50 mL e *headspace* de 60 mL (volume total de 110 mL).

Os reatores foram inoculados com lodo de um Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (UASB) que compunha uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) localizada no município de Fortaleza, Ceará, Brasil e operava em condições mesofílicas no tratamento de esgoto sanitário. O inóculo após a coleta foi caracterizado, apresentando concentrações de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT) e sólidos fixos totais (SFT) de $55,5 \pm 0,8$; $37,9 \pm 0,6$; 18 ± 1 g L⁻¹, respectivamente, bem como relação SVT/ST média foi de 0,68, qualificando o lodo como inóculo com aproximadamente 68% de fração orgânica (microrganismos).

A ARBF foi utilizada como substrato e a relação alimento/microrganismo (A/M) foi de $0,60 \pm 0,02$ g DQO·g SSV⁻¹, sendo anteriormente realizada a caracterização do lodo em termos de SSV para se obter a quantidade exata de sólidos a serem adicionados nas garrafas que continham lodo.

As concentrações de nutrientes e a formulação do meio basal foram realizadas conforme Angelidaki *et al.* (2009). O pH inicial foi ajustado para 7,0 com NaOH 1 N e, posteriormente, o bicarbonato de sódio (NaHCO₃) foi adicionado como tampão na proporção de 1 g de DQO para 1 g de NaHCO₃ (DOS SANTOS, 2005). Os biorreatores foram selados com rolhas de borracha butílica e purgados com nitrogênio (N₂), durante 1 minuto, a fim de manter a atmosfera anaeróbia dentro das garrafas. Em seguida, foram incubados em incubadora *shaker* (MA-420, Marconi LTDA, Brasil) sob agitação orbital de 150 rpm e temperatura de 35 °C durante 35 dias.

As pressões iniciais, intermediárias e finais no *headspace* foram determinadas por transmissor de pressão manométrico (Warne LTDA, Brasil). As pressões intermediárias eram medidas uma vez por semana ao longo do experimento. Ao final do ensaio, foi realizada uma análise de composição do biogás por cromatografia gasosa com detecção por descarga por ionização de barreira dielétrica (GC-BID, *gas chromatography-barrier ionization discharge*) (GC BID-2010 Plus, Shimadzu Corporation, Japão), na qual as concentrações de CH₄ foram obtidas. Posteriormente à análise de cromatografia, o volume acumulado de biogás no *headspace* foi medido a partir do deslocamento de solução salina (NaCl 25 g·L⁻¹) acidificada a pH 2,0 com H₂SO₄ P.A. em uma garrafa de Mariotte.

Para fins de balanço de massa e monitoramento da bioconversão e remoção de matéria orgânica durante o processo de digestão anaeróbia foram realizadas as análises de Demanda Química de Oxigênio nas frações total, solúvel e particulada segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012) e análises de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC, *high performance liquid chromatography*) para identificação e quantificação de ácidos carboxílicos produzidos utilizando cromatógrafo HPLC LC-20A Prominence, Shimadzu Corporation, Japão. Para as análises cromatográficas e para as análises de DQO solúvel, as amostras foram filtradas em membrana de fibra de vidro com poro de 0,45 µm (EMD Millipore, EUA).

As equações utilizadas no balanço de massa são apresentadas na Tabela 1 e a descrição das variáveis das Equações 1 a 8 estão expressos na Tabela 2.

Tabela 1: Equações utilizadas no cálculo do balanço de massa.

Equação	Equação do Balanço de Massa
1	$DQO_{residual} = DQO_{solúvel} - DQO_{ácidos}$
2	$DQO_{convertida} = DQO_{total} - DQO_{residual}$
3	$DQO_{SSV} = DQO_{convertida} - DQO_{CH_4} - DQO_{ácidos}$
4	$\%DQO_{convertida} = \frac{DQO_{convertida}}{DQO_{total}} \times 100$
5	$\%DQO_{ácidos} = \frac{DQO_{ácidos}}{DQO_{total}} \times 100$
6	$\%DQO_{SSV} = \frac{DQO_{SSV}}{DQO_{total}} \times 100$
7	$\%DQO_{residual} = \frac{DQO_{residual}}{DQO_{total}} \times 100$
8	$\%DQO_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{DQO_{total}} \times 100$

Tabela 2: Descrição das variáveis das equações utilizadas no balanço de massa.

Variável	Equação	Unidade	Descrição
DQO _{residual}	(1) (2) (7)	mg DQO	Massa de DQO solúvel lábil não bioconvertida em ácidos carboxílicos ou outros bioprodutos que possuem demanda química de oxigênio.
DQO _{solúvel}	(1)	mg DQO	Massa de DQO solúvel total (bioconvertida + não bioconvertida).
DQO _{ácidos}	(1) (3) (5)	mg DQO	Massa de DQO solúvel bioconvertida em ácidos carboxílicos.
DQO _{convertida}	(2) (3) (4)	mg DQO	Massa de DQO direcionada para a produção de ácidos carboxílicos, formação de metano e crescimento celular.
DQO _{Total}	(1) (4)-(8)	mg DQO	Massa de DQO total inserida no reator batelada.
DQO _{SSV}	(3) (6)	mg DQO	Massa de DQO direcionada ao crescimento celular.
DQO _{CH4}	(3) (8)	mg DQO	Massa de DQO removida por produção de metano.
%DQO _{convertida}	(4)	%	Porcentagem da DQO total direcionada à produção de ácidos carboxílicos, formação de metano e crescimento celular.
%DQO _{ácidos}	(5)	%	Porcentagem da DQO total direcionada à produção de ácidos.
%DQO _{SSV}	(6)	%	Porcentagem da DQO total direcionada ao crescimento celular.
%DQO _{residual}	(7)	%	Porcentagem da DQO total ainda passível de ser convertida a bioprodutos ao final do experimento.
%DQO _{CH4}	(8)	%	Porcentagem da DQO total direcionada à formação de metano.

A modelagem cinética da produção de CH₄ foi realizada por meio da equação modificada de Gompertz, conforme Equação 9.

$$B_t = B \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_b - e}{B} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad \text{Equação (9)}$$

Em que: B_t representa o CH₄ acumulado em um tempo t ; B é o potencial de produção de CH₄ (L). R_b é a taxa máxima de produção de CH₄ (L·d⁻¹); λ é o tempo de fase lag (d), que corresponde ao tempo necessário para que os microrganismos se adaptem ao ambiente ou o tempo necessário para a produção de biogás; e corresponde ao Número de Euler; t é o tempo de experimento adotado. A modelagem da cinética de produção de biogás foi feita no *software* Statistica versão 10.0 (StatSoft Power Solution, USA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pela caracterização físico-química da ARBF são expostos na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização físico-química da ARBF *in natura*.

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
pH	5,48	-
Condutividade Elétrica	1353,0	μS·cm ⁻¹
Nitrogênio Total	69,31	mg-N·L ⁻¹
Nitrogênio Kjeldahl (NTK)	68,9	mg-N·L ⁻¹
Fósforo Total	26,6	mg-P·L ⁻¹
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	17,8	mg·L ⁻¹
Demanda Química de Oxigênio Total (DQO _T)	2107	mgO ₂ ·L ⁻¹
Demanda Bioquímica de Oxigênio Total (DBO ₅ ^{20°C})	1621	mgO ₂ ·L ⁻¹
Sólidos Totais (ST)	1450	mg·L ⁻¹
Sólidos Totais Voláteis (STV)	763	mg·L ⁻¹
Sólidos Totais Fixos (STF)	687	mg·L ⁻¹

Conforme os dados expressos na Tabela 3, a relação DBO/DQO é de aproximadamente 0,80, indicando que a ARBF *in natura* é biodegradável e pode ser tratada utilizando processos biológicos. Segundo Pereira *et al.* (2013), os valores de pH e alcalinidade não são suficientes para manutenção do tamponamento em reatores anaeróbios, podendo exigir correção previa do pH com alcalinizantes antes do tratamento biológico.

A partir das análises relacionadas à produção de gases, pôde-se observar que o CH₄ foi o gás produzido em maiores concentrações (83,7% v/v), seguido pelo CO₂ (16,8% v/v) e pelo H₂S (0,03% v/v). Os outros gases não apresentaram concentrações significativas, visto que se situaram abaixo do limite de detecção do método

cromatográfico. As massas de DQO inicial, final e convertida em metano bem como os rendimentos de CH₄ obtidos no experimento para cada reator, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Relações entre as massas de DQO e os rendimentos de CH₄ obtidos nos ensaios em batelada.

Reator	DQO inicial (mg)	DQO final (mg)	DQO removida (mg)	DQO convertida CH ₄ (mg)	Y _{CH₄} (mL de CH ₄ /g DQO removida)	Y _{2CH₄} (mL CH ₄ /g DQO aplicada)
R1	86,9	18,8	68,1	49,4	287	225
R2	86,9	16,3	70,6	51,3	288	234
R3	86,9	15,7	71,1	49,4	275	223
Média	86,9	17 ± 1,6	70 ± 1,6	50 ± 1,1	283 ± 7	228 ± 6

Obteve-se rendimento de 283 mL CH₄/g de DQO removida e 228 mL CH₄/g de DQO aplicada (Tabela 4). Em média, 71,5 ± 1,9% da DQO removida foi por conversão a CH₄, correspondendo a 0,72 g de CH₄/g de DQO removida. Além disso, o balanço de massa em termos de DQO, realizado ao final do experimento, demonstrou que 58% da matéria orgânica foi convertida a CH₄, 16% a ácidos carboxílicos, indicando que maior parte dos ácidos produzidos nas etapas de acidogênese e de acetogênese foi consumida na metanogênese, 23% em biomassa (SSV) e 3% ainda era passível de biodegradação no final do experimento, totalizando 97% de DQO convertida.

O resultado obtido neste experimento de rendimento de produção de metano por DQO removida (283 mL CH₄/g de DQO removida) foi superior ao obtido por Demirel *et al.* (2013) que estudaram o potencial de produção de biogás a partir da água residuária de uma fábrica de sorvetes em reatores batelada (1,0 L) sob condições operacionais semelhantes (temperatura mesofílica e pH neutro) e obtiveram um rendimento médio de 170 ± 1,4 mL de CH₄/g de DQO removida em seus experimentos.

De forma geral, para o tratamento anaeróbio de águas residuárias de indústrias de produtos lácteos, como a de produção de sorvetes, a fração de CH₄ presente no biogás reportada na literatura se situa na faixa de 60-85% (CHANDRA *et al.*, 2018; DEMIREL *et al.*, 2013) o que condiz com o resultado obtido neste experimento (83,7%). A partir dessa perspectiva, o CH₄ é um dos gases mais relevante sob o viés econômico e energético produzidos na digestão anaeróbia, estimando-se que um biogás com 65% de CH₄ apresente poder calorífico de 22,35 kJ.m⁻³ (FILHO *et al.*, 2018). Para obtenção de energia com melhor custo-benefício, muitas vezes o biogás deve ser enriquecido e purificado (pela eliminação de N₂ + O₂, CO₂ e H₂S) de forma que se obtenha cerca de 98% de CH₄, o que o faz assumir características semelhantes ao gás natural veicular (GNV) e amplia suas formas de aplicação (OSORIO; TORRES, 2009). Neste trabalho, a elevada fração de CH₄ obtida (83,7% v/v) permite inferir que a ARBF da produção de sorvetes é uma água residuária passível de ser aplicada como substrato na digestão anaeróbia para recuperação de energia, com possibilidade de purificação de forma economicamente viável.

Observando-se os dados do balanço de massa em termos de DQO, nota-se que uma parcela ainda considerável (16%) de matéria orgânica estava na forma de ácidos carboxílicos ao final do experimento. Esse fato sugere que a prospecção desse tipo de metabólito também pode ser viável no processo de digestão anaeróbia da ARBF da produção de sorvetes, visto que ácidos carboxílicos são produtos de valor agregado amplamente empregados em diferentes indústrias como *building block chemicals*. Na literatura, a prospecção desses ácidos a partir de resíduos agroindustriais já é bem estabelecida (ZHOU *et al.*, 2018); contudo, o uso da ARBF da produção de sorvetes como substrato com esse objetivo ainda não foi registrado.

Os parâmetros da equação modificada de Gompertz que foram estimados para a produção de CH₄ são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros da equação modificada de Gompertz.

Reator	B (mL)	R _b (mL CH ₄ d ⁻¹)	λ (d)	R ²
R1	19,5	0,8	1,5	0,946
R2	20,3	0,8	0,5	0,953
R3	19,5	0,8	1,0	0,954
Média	19,8 ± 0,4	0,80 ± 0,03	1,0 ± 0,5	0,951

A partir dos parâmetros obtidos (Tabela 5), considera-se que os dados experimentais se ajustaram de forma satisfatória e estatisticamente significativa ao modelo modificado de Gompertz, visto o elevado coeficiente de determinação encontrado ($R^2 = 0,951$). Os biorreatores produziram, em média, $19,80 \pm 0,4$ mL de metano ao longo de 35 dias de ensaio, sendo que o valor médio da taxa máxima de produção de CH_4 foi de $0,80 \pm 0,03$ mL CH_4d^{-1} . O valor de λ revela que os microrganismos demoraram em média $1,0 \pm 0,5$ dias em fase *lag*.

A estimativa dos parâmetros cinéticos obtidos por meio do modelo modificado de Gompertz permite aplicações práticas significativas nos métodos de tratamento desse tipo de água residuária em escala piloto e na recuperação de bioprodutos. Nguyen *et al.* (2016) investigaram a variação desses parâmetros sob diferentes cargas orgânicas volumétricas (COV) em um reator anaeróbio semicontínuo tratando resíduos da indústria alimentícia e concluíram que todos os parâmetros são alterados dependendo da COV. Os autores observaram que, quanto maior a COV, maior a taxa máxima de produção de CH_4 e maior o tempo de fase *lag*. Isso permite inferir que se faz imperativo o teste de diferentes condições, como tipo de reator, relação A/M, tipo de inóculo, temperatura, pH, para que se diminua o tempo de fase *lag*, já que esta é indesejada em processos biotecnológicos, mantendo-se máximo o rendimento de CH_4 (NGUYEN *et al.*, 2016).

O gráfico obtido para a modelagem cinética da produção de CH_4 é apresentado na Figura 1. Observa-se que mesmo com elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,951$), percebe-se que a curva gerada pelo modelo de Gompertz Modificado não se assemelha ao formato da curva cumulativa de metano gerada pelos dados coletados durante o experimento de biometanização da ARBF. Isso pode contribuir para a determinação de parâmetros cinéticos que não descrevam de forma adequada a curva original de produção de metano. Por isso, outros modelos poderiam ser estudados para definir o mais adequado para descrever o processo de biometanização da ARBF, como Stover-Kincannon, Chen-Hashimoto, Deng, Richards, Cone, Logístico, entre outros (YANG *et al.*, 2016; ZHAO *et al.*, 2018).

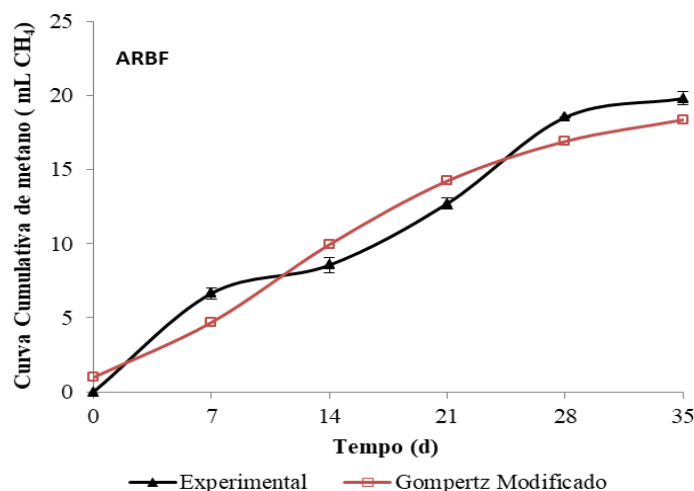


Figura 1: Modelagem cinética da produção de CH_4 durante o processo de digestão anaeróbia de ARBF da produção de sorvetes.

CONCLUSÕES

O rendimento de produção de metano a partir da biometanização da ARBF foram 283 mL CH_4/g de DQO removida e 228 mL CH_4/g de DQO aplicada, respectivamente. Obteve-se um biogás rico em metano (83,7%), apresentando um acúmulo médio de $19,80 \pm 0,5$ mL de CH_4 . Os resultados sugerem que a ARBF é um substrato viável para ser utilizado na prospecção de metano, com potencial de purificação de CH_4 com bom custo-benefício.

O modelo modificado de Gompertz se ajustou aos dados experimentais com coeficiente de determinação igual a $R^2 = 0,951$, permitindo definir parâmetros importantes ao projeto e operação do bioprocessos.

Visto escassez de trabalhos com essa água residuária, fazem-se necessárias pesquisas de recuperação de metano e de outros bioprodutos da digestão anaeróbia, como ácidos carboxílicos e hidrogênio, bem como a

aplicação de outros modelos matemáticos, visando obter um modelo que melhor descreva a biometanização da ARBF.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABU-REESH, I. M. Kinetics of anaerobic digestion of labaneh whey in a batch reactor. *African Journal of Biotechnology*, v. 13, n. 16, 2014.
2. ANGELIDAKI, I. *et al.* Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009.
3. APHA. *Standard Methods: for the examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington, D.C.: APHA - American Public Health Association, 2012.
4. CHANDRA, R. *et al.* A biorefinery approach for dairy wastewater treatment and product recovery towards establishing a biorefinery complexity index. *Journal of Cleaner Production*, v. 183, p. 1184-1196, 2018.
5. DEMIREL, B. *et al.* Recovery of biogas as a source of renewable energy from ice-cream production residues and wastewater. *Environmental Technology*, v. 34, n. 13-14, p. 2099-2104, 2013.
6. DOLLHOFER, V. *et al.* Accelerated biogas production from lignocellulosic biomass after pre-treatment with *Neocallimastix frontalis*. *Bioresource Technology*, v. 264, p. 219-227, 2018.
7. DOS SANTOS, A. B. Aplicação conjunta de tratamento anaeróbio termofílico por lodo granular e de mediadores redox na remoção de cor de águas residuárias têxteis. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, p. 253-259, 2005.
8. ENTESHARI, M.; MARTÍNEZ-MONTEAGUDO, S. I. Subcritical hydrolysis of ice-cream wastewater: Modeling and functional properties of hydrolysate. *Food and Bioproducts Processing*, v. 111, p. 104-113, 2018.
9. FILHO, M. G. *et al.* Energy recovery from wine sector wastes: A study about the biogas generation potential in a vineyard from Rio Grande do Sul, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 29, p. 44-49, 2018.
10. KHAN, I. U. *et al.* Biogas as a renewable energy fuel—a review of biogas upgrading, utilization and storage. *Energy Conversion and Management*, v. 150, p. 277-294, 2017.
11. MILANEZ, A. Y. *et al.* Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. 2018.
12. NGUYEN, D. D. *et al.* Dry thermophilic semi-continuous anaerobic digestion of food waste: performance evaluation, modified Gompertz model analysis, and energy balance. *Energy Conversion and Management*, v. 128, p. 203-210, 2016.
13. OSORIO, F.; TORRES, J. C. Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. *Renewable Energy*, v. 34, n. 10, p. 2164-2171, 2009.
14. PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MOTTERAN, F. Physicochemical study of pH, alkalinity and total acidity in a system composed of Anaerobic Baffled Reactor in series with Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor in the treatment of pig farming wastewater. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 35, p. 477-483, 2013.
15. VILELA, M. L. Tratamento biológico do resíduo da indústria de sorvetes por zygomycetes. Recife, 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CCB. Programa de Pós-Graduação em Biologia de Fungos, 2012.
16. YANG, H. *et al.* A model for methane production in anaerobic digestion of swine wastewater. *Water Research*, v. 102, p. 464-474, 2016.
17. ZHAO, X. *et al.* Modified Anaerobic Digestion Model No. 1 for modeling methane production from food waste in batch and semi-continuous anaerobic digestions. *Bioresource Technology*, 2018.
18. ZHOU, M. *et al.* Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: a mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. *Bioresource Technology*, 2017.