



CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BAGAÇO DE LARANJA, CASCA DE MARACUJÁ E BAGAÇO DE CAJU PARA CÁLCULO TEÓRICO DO POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL BAGAZO DE NARANJA, CÁSCARA DE MARACUYÁ Y LUBINA DE ANACARDO Y CÁLCULO TEÓRICO DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DEL METANO

PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERIZATION OF ORANGE BAGASSE, PASSION FRUIT PEEL AND CASHEW BAGASSE FOR THEORETICAL CALCULATION OF THE BIOCHEMICAL POTENTIAL OF METHANE

Liliana Andréa dos Santos¹; Fábio Ferreira Batista²; Gutemberg Francisco Silva³; José Fernando Thomé Jucá⁴; André Felipe de Melo Sales Santos⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/IIICIAGRO.0255>

RESUMO

A indústria de alimentos e, sobretudo no processamento industrial de frutas ocorre a geração de grandes quantidades de subprodutos, geralmente descartados ou utilizados de forma menos nobre ou descartados no meio ambiente, desvalorizando seus potenciais usos. Os resíduos gerados podem ser utilizados para uma infinidade de outros usos que incluem sua valorização como fonte de nutriente, substâncias de interesse biotecnológico, potencial uso na agroindústria ou sua valorização energética. A possibilidade de uso desses resíduos para a produção de metano (CH₄), por exemplo, contribuindo para a geração energética descentralizada com ganhos a todo ciclo produtivo vem ganhando importância na agroindústria. Os resíduos de bagaço de laranja (BL), Casca de maracujá (CM) e bagaço de caju (BC), são os mais produzidos pela indústria de sucos nacional. A caracterização físico-química detalhada desses resíduos pode ser uma alternativa mais prática para a determinação teórica do Potencial Bioquímico de Metano (PBM) em detrimento da aplicação de testes laboratoriais caros e com aparatos experimentais e analíticos mais complexos. Neste sentido, este trabalho objetivou apresentar a

¹ Profa.Doutora no Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental, ITEP, liliana.andrea.santos@gmail.com

² Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, fabio19ferreira@gmail.com

³ Técnico em Edificações, Universidade Federal de Pernambuco, comfgberg73@gmail.com

⁴ Prof. Doutor do Departamento de Engenharia Civil, UFPE, jucah@ufpe.br

⁵ Prof. Doutor do Departamento de Tecnologia Rural, UFRPE, andre.felipesantos@ufrpe.br

caracterização de resíduos das frutas mais utilizadas pela indústria de frutas nacional e relacionar as suas características a possibilidades de determinar de maneira mais objetiva o PBM. Foi realizada uma caracterização físico-química detalhada dos resíduos de BL, CM e BC para os parâmetros pH: umidade e ST (%), STV (%), C, N (%), Celulose, hemicelulose e lignina (%). A partir da caracterização observou-se que apesar ácidos os substratos são favoráveis a digestão anaeróbica, com destaque para o BC que pode necessitar de processos de pré-tratamentos a biodigestão anaeróbia devido o teor de fibras mais elevado. A caracterização físico-química previa dos resíduos é uma alternativa de obtenção do PBM teórico, com custo, velocidade de resposta menores mantendo alta onfiabilidade dos resultados obtidos e uteis para dimensionamentos de projetos de valorização energética de resíduos da agroindústria.

Palavras-Chave: Cascas de frutas; metano; biogás; agroindústria; indústria de sucos

RESUMEN

La industria alimentaria, y especialmente en la industria frutícola, genera grandes cantidades de subproductos, normalmente desechados o aprovechados de forma menos noble o incluso desechados en el medio ambiente, desvalorizando sus usos potenciales. Los residuos generados pueden destinarse a multitud de otros usos que incluyen su valorización como fuente de nutrientes, sustancias de interés biotecnológico, uso potencial en la agroindustria o su valorización energética. La posibilidad de utilizar estos residuos para la producción de metano (CH₄), por ejemplo, contribuyendo a la generación descentralizada de energía con ganancias en todo el ciclo productivo ha ido cobrando importancia en la agroindustria. Los residuos de orujo de naranja (BL), cáscara de maracuyá (CM) y bagazo de marañón (BC) son los más producidos por la industria nacional de jugos. La caracterización físico-química detallada de estos residuos puede ser una alternativa más práctica para la determinación teórica del Potencial Bioquímico del Metano (BMP) a expensas de la aplicación de costosas pruebas de laboratorio y con aparatos experimentales y analíticos más complejos. En ese sentido, este trabajo tuvo como objetivo presentar la caracterización de los residuos de las frutas más utilizadas por la industria frutícola nacional y relacionar sus características con las posibilidades de determinar el PBM de una manera más objetiva. Se realizó una caracterización físico-química detallada de los residuos de BL, CM y BC para los parámetros de pH: humedad y ST (%), STV (%), C, N (%), Celulosa, hemicelulosa y lignina (%). A partir de la caracterización se observó que a pesar de los ácidos, los sustratos son favorables a la digestión anaeróbica, con énfasis en los BC que pueden requerir procesos de pretratamiento a la digestión anaeróbica debido al mayor contenido de fibra. La caracterización físico-química previa de los residuos es una alternativa para obtener el PBM teórico, con menor costo, rapidez de respuesta, manteniendo alta confiabilidad de los resultados obtenidos y útil para dimensionar proyectos de valorización energética de residuos agroindustriales.

Palabras-Clave: Cáscaras de frutas; metano; biogás; agroindustria; industria del jugo

ABSTRACT

The food industry, and especially in the fruit industry, generates large amounts of by-products, usually discarded or used in a less noble way or even discarded in the environment, devaluing their potential uses. The waste generated can be used for a multitude of other uses that include its recovery as a source of nutrients, substances of biotechnological interest, potential use in agribusiness or its energy recovery. The possibility of using these residues for the production of methane (CH₄), for example, contributing to decentralized energy generation with gains in the entire production cycle has been gaining importance in the agroindustry. The residues of orange pomace (BL), passion fruit peel (CM) and cashew bagasse (BC) are the most produced by the national juice industry. The detailed physical-chemical characterization of these residues can be a more practical alternative for the theoretical determination of the Biochemical Potential of Methane (BMP) at the expense of the application of expensive laboratory tests and with more complex experimental and analytical apparatus. In this sense, this work aimed to present the characterization of residues of the fruits most used by the national fruit industry and to relate

their characteristics to the possibilities of determining the PBM in a more objective way. A detailed physical-chemical characterization of BL, CM and BC residues was carried out for the pH parameters: moisture and ST (%), STV (%), C, N (%), Cellulose, hemicellulose, and lignin (%). From the characterization, it was observed that despite acids, the substrates are favorable to anaerobic digestion, with emphasis on BC that may need pre-treatment processes to anaerobic digestion due to the higher fiber content. The previous physical-chemical characterization of the residues is an alternative to obtain the theoretical PBM, with lower cost, response speed, maintaining high reliability of the results obtained and useful for sizing projects for the energy recovery of agroindustry residues.

Keywords: Fruit peels; methane; biogas; agribusiness; juice industry

INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de frutas *in natura* do mundo, ocupando a terceira colocação no *ranking* de produção de frutas, perdendo apenas para China e Índia, produzindo cerca de 39,7 milhões de toneladas de frutas *in natura* em 2020 (STATIST, 2022). As principais frutas produzidas foram laranjas, bananas, melancia, abacaxis, coco, lima, uva, manga, açaí, maçã, mamão, tangerina e maracujá. Em relação à demanda de mercado, o processamento de frutas é crucial para potencializar o aproveitamento de frutas, pois permite transformar frutas perecíveis em produtos armazenáveis (SANTOS, 2019).

Após o processamento de frutas, para fins de produção de sucos e polpas, são gerados grande quantidade de resíduos, constituídos por bagaço, cascas, sementes, caroços e parte da polpa, representando 10% a 60% da fruta, os quais são descartados ou não valorizados (DO NASCIMENTO FILHO, FRANCO, 2015; SANTOS, 2019), sobretudo no processamento frutas ocorre a geração de grandes quantidades de subprodutos, os quais são descartados, sendo tratados como rejeitos, descartando seus potenciais usos, assim contribuindo para a poluição ambiental, sendo lançados sem tratamento prévio em lixões, terrenos baldios ou mananciais (INFANTE et al., 2013). Contudo, estes resíduos gerados podem ser utilizados para produzir produtos de valor agregado, como biocombustíveis, biopolímeros, fertilizantes e alimentos para animais (CUI et al., 2015).

Neste sentido, uma alternativa que vem ganhando destaque dentro do cenário da matriz energética nacional é a possibilidade de uso desses resíduos para a produção de metano (CH_4), contribuindo para a geração energética descentralizada com ganhos a todo ciclo produtivo. O biogás rico em metano (60 - 70% em média) possui um alto poder calorífico de cerca de 22500 a 25000 kJ/m^3 . Admitindo o CH_4 puro esse valor chega a 35800 kJ/m^3 . Isto significa um

aproveitamento de 6,25 a 10 kWh/m³. Sua potencialidade é demonstrada quando tratado, pois, o seu poder calorífico pode chegar a 60% do poder calorífico do gás natural (LORA e VENTURINI, 2012). Essa quantidade de calor pode ser utilizado na própria indústria produzindo vapor ou energia e gás natural veicular (GNV). Reincorporando parte da energia perdida no próprio ciclo produtivo, com ganho econômico e redução de impactos ambientais. Tal vantagem permite maiores ganhos agregando valor ao produto e reduzindo custos de produção, aumentando sua competitividade em relação a outros concorrentes. Há também a alternativa de venda do excedente energético para a rede de distribuição além de desafogar o sistema elétrico nacional e torná-lo descentralizado e menos crítico em termos de dependências de grandes geradores.

Dentre as frutas mais consumidas, a laranja, o maracujá e o caju tem destaque mundial em termos de consumo direto ou indireto para produtos processados. Ao mesmo tempo, a geração exacerbada de resíduos pode se tornar uma problemática ambiental decorrendo em custos para as agroindústrias. Entretanto, estes podem também ser fontes de recursos, mediante processamento tecnológico adequado, com destaque para a produção de ração animal (SILVA et al., 2014), enzimas (ABUD; ARAÚJO; ALMEIDA, 2015), produção de biogás e de substratos para a própria indústria (SOUZA et al., 2013). A predisposição para cada uma das alternativas tecnológicas que a indústria poderá definir para a valorização de seus subprodutos dependerá do tipo de resíduo gerado, de suas características físico-químicas, dos teores de nutrientes ou substância com interesse biotecnológico, visto que cada qual pode conter diferentes compostos bioativos em concentrações variadas. A recuperação de produtos de valor agregado a partir da biomassa pode ser uma estratégia para diminuir tanto o custo de descarte quanto para combater os problemas relacionados ao aumento da produção de resíduos, isso pode ser alcançado utilizando tecnologias inovadoras relacionadas à economia circular, que se baseia no conceito de maximização de lucros a partir de resíduos sem a geração de fluxos adicionais a serem eliminados (VALENTINO et al., 2018).

Nos últimos anos, múltiplas biotecnologias têm sido implementadas com diferentes abordagens, onde tratamentos bioquímicos como digestão anaeróbia, compostagem, ou termoquímicos como gaseificação ou pirólise estão se destacando em escala industrial (TYAGI et al., 2018) e passando a ter viabilidade técnica e econômica com lucros socioambientais. Dessa

forma, esses resíduos de frutas que antes eram descartados pela agroindústria de suco, podem ser utilizados como biomassa para a produção de energia por métodos renováveis como a digestão anaeróbia. A digestão anaeróbia é um processo natural onde a matéria orgânica é degradada na ausência de oxigênio transformando-a em em sua maioria em biogás, mistura gasosa de metano e dióxido de carbono. Essas tecnologias de tratamentos biológicos utilizáveis para o tratamento dos resíduos orgânicos, são hoje seriamente consideradas no mundo, devido às características de baixo consumo de energia, baixo custo e investimento, alta taxa de remoção orgânica e ao fato de atender à exigência de economia circular (SIDDIQUE; ZULARISAM, 2018). O conhecimento detalhado da composição físico-química dos resíduos gerados pela indústria pode antecipar etapas de projeto e dimensionamento de alternativas de processos mais limpos e que incluam a valorização energética no ciclo produtivolevando a melhores tomadas de decisão em novos ou antigosempreendimentos.

Diante disso, o trabalho teve como objetivo realizar a caracterização físico-química do bagaço de laranja, casca de maracujá e bagaço de caju para cálculo teórico do potencial bioquímico de metano.

REFERENCIAL TEÓRICO

Produção de frutas e geração de resíduos

A laranja é o fruto produzido pela laranjeira (*Citrus sinensis*), pertencente à família Rutaceae-(MEDEIROS, 2014). O Brasil é líder mundial na produção e exportação de laranjas, com aproximadamente 18 milhões de toneladas (USDA, 2019). No âmbito nacional, o estado de São Paulo é o maior produtor de laranjas, com mais de 12 milhões toneladas em 2019 (IBGE, 2019). No Brasil, mais de 85% da produção de laranja é utilizada pela indústria de suco, após a extração do suco de laranja, cerca de 50% da fruta é descartada em forma de bagaço, casca ou polpa. O bagaço de laranja contém vários polímeros de carboidratos solúveis e insolúveis que são a matéria-prima ideal para conversão em biocombustíveis biológicos, como etanol e biogás (TAGHIZADEH-ALISARAEI et al., 2016).

O caju (*Anacardium occidentale* L.) é uma fruta nativa da América do Sul e é cultivada na América (Norte, Sul e Central), África e Ásia (LIU et al., 2016). Os principais produtos

obtidos do caju são a amêndoa da castanha de caju, retirada no processamento da castanha (verdadeiro fruto), o líquido da casca de castanha-de-caju, usado na indústria química com alto valor comercial. O pedúnculo do caju (pseudofruto) é processado por indústrias para a obtenção do suco, polpa congelada, para fabricação de sucos, cajuínas e outras bebidas. O caju ainda é vendido como fruto de mesa (LEITÃO et al., 2011).

O Brasil produziu cerca de 120 mil toneladas de castanha e 1 milhão de toneladas de pedúnculos de caju em 2019 (IBGE, 2019). O pedúnculo de caju após a retirada da castanha, não é valorizado, estima-se que mais de 90% são desperdiçados. Entretanto, o aproveitamento nas agroindústrias representa apenas 20% da produção anual do pedúnculo no Nordeste. No processamento do pedúnculo na indústria de suco durante a prensagem gera como resíduo o bagaço de caju, que representa 20% em peso do pedúnculo (LEITÃO et al., 2011). O bagaço de caju devido a sua rápida biodegradação, geralmente é descartado ou doado devido ao alto custo de armazenamento e transporte que inviabiliza a venda do bagaço como ração (LEITÃO et al., 2011). O bagaço de caju é um resíduo gerado em grande quantidade, pode ser utilizado como biomassa na produção de biogás devido as suas características de elevada umidade e sólidos voláteis e alta biodegradabilidade (LEITÃO et al., 2011; SANTOS, 2019).

Em relação ao maracujá, o Brasil é o maior produtor e consumidor de maracujá do mundo, com 95% da produção nacional de maracujá sendo representado pelo maracujazeiro-azedo (*Passiflora edulis* Sims) (JESUS et al., 2016). Em 2017, o país produziu 554 mil toneladas, sendo a região Nordeste a maior produtora nacional com 337 mil toneladas (IBGE, 2019). Cerca de 60% do maracujá é utilizado para consumo *in natura*, 40% na indústria de suco, principalmente para extração de polpa para fabricação de suco. Os subprodutos do processamento de maracujá amarelo oriundos da produção de suco são a casca e as sementes, que representam 40 a 60% da massa total do fruto (DEUS et al., 2014). Estes resíduos gerados também são descartados em aterros sanitários ou usados como ração animal, entretanto devido aos altos custos de armazenamento e transporte também são doados (SANTOS, 2019).

METODOLOGIA

Obtenção dos resíduos

As amostras *in natura* dos resíduos de casca maracujá (CM) e bagaço de laranja (BL)

foram obtidos de um mercado local localizado na cidade do Recife no Estado de Pernambuco. A amostra de bagaço de caju (BC) *in natura* foi obtida da Empresa Brasileira de Bebidas e Alimentos S.A., localizada no município de Aracati, no Estado do Ceará.

Antes da realização dos ensaios, o suco foi completamente extraído das frutas. Os resíduos (BL e CM) foram picados de modo manual em pedaços de aproximadamente 2x2cm. O resíduo de caju obtido da indústria de suco já veio processado, sem suco, na forma de bagaço (BC).

Caracterização físico-química dos resíduos

Para a caracterização físico-química os resíduos foram levados a secagem em estufa a 65 °C até a estabilização da umidade. Os resíduos secos foram triturados em moinho de facas (tipo Willye, marca SPLabor), homogeneizados, peneirados (peneira de 32 mesh, 0,5 mm) e armazenados em temperatura ambiente (26 ±2 °C). Foram realizadas as seguintes análises físico-químicas de potencial hidrogeniônico (pH), teor umidade, sólidos totais, sólidos voláteis, análise elementar de carbono (C), nitrogênio (N), lignina, hemicelulose e celulose (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo dos parâmetros de caracterização físico-química dos resíduos de frutas

Parâmetros	Equipamento	Metodologia
pH	pHmetro Digimed DM23	Potenciométrico
Umidade e ST (%)	Estufa Te-393/1-Mp	WHO (1978)
SV (%)	Mufla EDG 3000	SMEWW (1995)
C, N (%)	Carlo-Erba Instruments, modelo EA 1110	SMEWW (1995)
Celulose, hemicelulose e lignina	149- Tecnal	Van Soest (1994)

Fonte: Autores (2019)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teor de umidade

Os resíduos de frutas estudados (BL, CM, BC) contém elevado teor de umidade, sendo favorável para digestão anaeróbia (Tabela 2).

Tabela 1. Teor de umidade e sólidos totais dos resíduos

Resíduos	Umidade (%)	Sólidos Totais (%)	Referências
----------	-------------	--------------------	-------------

	81	19	Este Estudo
BL	75	25	Calabró et al. (2016)
	87	13	Santos et al. (2022)
CM	81	19	Este estudo
	87	13	Zhao et al. (2016)
BC	71	29	Este estudo
	78	22	Prabhudessai et al. (2013)

Legenda: CM: Casca de maracujá; BL: Bagaço de laranja; BC: Bagaço de caju.

Fonte: Autores (2019)

A umidade é um parâmetro importante no processo de digestão anaeróbia, facilitando o contato dos micro-organismos com substrato e o transporte de nutrientes, além disso atua como agente condutor de enzimas e outros metabólitos para o processo (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; REIS, 2012).

De acordo com a Tabela 2, vários autores encontraram valores similares de teor de umidade para os resíduos de frutas estudados (PRABHUDESSAI et al., 2013; CALABRÒ et al., 2016; SANTOS et al., 2022).

Sólidos totais voláteis

Conforme a Tabela 3, os resíduos BC, CM e BC obtiveram alta percentagem de sólidos voláteis, indicando elevada fração orgânica, sendo favorável para utilização desses resíduos no processo de digestão anaeróbia.

Tabela 2. Teor de sólidos totais voláteis dos resíduos

Resíduos	Sólidos totais voláteis	Referências
	(%)	
BC	95	Este Estudo
	96	Calabrò et al. (2016)
	94	Santos et al., (2022)
CM	94	Este estudo
	22	Zhao et al. (2016)
BC	96	Este estudo
	32	Antwi et al. (2017)

Legenda: CM: Casca de maracujá; BL: Bagaço de laranja; BC: Bagaço de caju.

Fonte: Autores (2019)

Os sólidos voláteis dos resíduos, variou de 90 a 96%, cujos valores estão próximos aos encontrados na literatura para resíduos de frutas. Valores inferiores de Sólidos Voláteis foram encontrados por Prabhudessai et al. (2013), Zhao et al. (2016) e Antwi et al. (2017) para bagaço de caju e casca de maracujá (Tabela 3).

pH

O pH dos resíduos BC, CM e BC apresentou valor na faixa ácida (3,4 a 4,2), típico para resíduos de frutas (Tabela 4) não na faixa adequada para o processo. Conforme apresentado na Tabela x, alguns autores encontraram valores semelhantes de pH de 3,0 a 4,2 para os resíduos estudados. O pH é parametro essencial para a digestão anaeróbia, pois afetar diretamente a atividade dos micro-organismos acidogênicos e metanogênicos, reduzindo a produção de biogás.

Tabela 3. pH dos resíduos

Resíduos	pH	Referências
BL	4,0	Este Estudo
	4,1	Carvalho et al. (2017)
	3,7	Santos et al. (2022)
CM	3,7	Este estudo
	3,9	Deus et al. (2014)
BC	4,2	Este estudo
	4,2	Nikiema et al. (2020)

Legenda: CM: Casca de maracujá; BL: Bagaço de laranja; BC: Bagaço de caju.

Fonte: Autores (2019)

Análise elementar

Os valores de carbono, nitrogênio, dos substratos (BL, CM e BC) apresentaram próximos do encontrado na literatura (Tabela 5).

Tabela 4. Análise elementar e relação C/N dos resíduos

Resíduos	C	N	C/N	Referências
----------	---	---	-----	-------------

	41	1,2	30	Este estudo
BL	44	0,8	58	Siles et al. (2016)
	41	1,2	34	Martin et al. (2010)
CM	39	0,8	52	Este estudo
	40	1,8	22	Zhao et al. (2016)
BC	46	1,6	28	Este estudo
	45	0,8	28	Alves et al. (2020)

Legenda: CM: Casca de maracujá; BL: Bagaço de laranja; BC: Bagaço de caju.

Fonte: Autores (2019)

O carbono, foi o elemento encontrado em maior concentração em BL, CM e BC, como era de se esperar em resíduos lignocelulósicos. Em termos de nitrogênio, os resíduos BL e BC obtiveram valores similares, enquanto o substrato MS apresentou valor inferior. a proporção adequada de macro e micronutrientes são um pré-requisito para estabilidade da digestão anaeróbia (FRN, 2013).

A relação C/N dos resíduos BL e BC estava dentro da faixa ideal (C/N de 20 a 30) para maior produção de metano em biodigestores (FORSTER-CARNEIRO et al., 2008). CM apresentou relação C/N (52) elevada, sendo desfavorável à digestão anaeróbia, devido a redução do metabolismo dos micro-organismos durante o processo, ocasionando redução na produção de metano.

Análise de fibras

Os valores de hemicelulose, lignina e celulose para os substratos de bagaço de laranja, casca de maracujá e bagaço de caju estão próximos do encontrado na literatura (Tabela 6).

Tabela 5. Porcentagem de fibras dos resíduos

Resíduos	Lignina	Hemicelulose	Celulose	Referências
	1,35	6,6	15	Este Estudo
BL	2,81	26	10	Orozco et al. (2014)
	3,9	7,6	15	Ramos-Ibarra et al. (2017)
CM	4,9	12	25	Este estudo

	9,5	13	32	Zhao et al. (2016)
	35	16	12	Este estudo
BC	35	-	-	Serpa et al., (2020)

Legenda: CM: Casca de maracujá; BL: Bagaço de laranja; BC: Bagaço de caju.

Fonte: Autores (2019)

O substrato BC apresentou maior percentual de lignina (34%) e hemicelulose (16%), em relação aos outros resíduos, indicando que o resíduo é de difícil degradação. A lignina e a hemicelulose atuam como barreira física, dificultando a conversão da biomassa em açúcares fermentáveis (DOLLHOFER et al., 2015). Em relação à celulose, a CM apresentou o maior percentual (25,4%), quando comparada aos substratos BL e BC. A celulose, devido ao seu grau de cristalização e polimerização, está entre os fatores que mais afetam a biodegradabilidade anaeróbia de substratos lignocelulósicos (ZHENG et al., 2014; DOLLHOFER et al., 2015).

Alguns autores relatam valores semelhantes de lignina (1,0 a 38%), hemicelulose (2 a 36%) e celulose (12 a 29%) para resíduos de frutas conforme mostrado na Tabela 6.

Caracterização dos resíduos e cálculo teórico do PBM

A caracterização quantitativa e qualitativa é a primeira etapa para se determinar um projeto de valorização energética de resíduos em qualquer escala industrial. A partir destes dados básicos e da tecnologia a ser empregada é possível estimar a quantidade de energia gerada teoricamente via composição ou por testes laboratoriais. A vantagem do uso da composição do resíduo apenas para se determinar a Potencial de Bioquímico de Metano (PBM) é enorme visto que os testes em laboratório requerem aparatos experimentais e analíticos complexos, com custos elevados que podem ser impeditivos para alguns empreendimentos de menores porte. Já a composição do resíduo é mais barato e prático de se obter e geralmente já faz parte da rotina do controle de qualidade industrial, mesmo em empreendimentos menores.

A metodologia proposta por Edwiges et al. (2018) determina o PBM teórico a partir de dados de caracterização do resíduo.

Vários autores tem reportado valores de PBM a partir de testes laboratoriais tais como os apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores e faixas de PBM reportados na literatura para os resíduos estudados

Resíduos	PBM (NmLCH₄/gSV)	Referência
	360	Calabro e Panzera (2017)
BL	78-121	Santos et al. (2020)
	78-171	Santos et al. (2022)
CM	195	Zhao et al. (2016)
	78-115	Santos et al. (2020)
BC	64	Santos et al. (2020)
	47	Nikiema et al. (2020)

Legenda: CM: Casca de maracujá; BL: Bagaço de laranja; BC: Bagaço de caju.

Fonte: Autores (2019)

Esses dados obtidos na Tabela 7 assim como os calculados a partir da composição físico-química podem ser úteis no cálculo do potencial de geração máximo de metano possível pelo empreendimento a depender da geração quantitativa de resíduos do empreendimento, sendo a alternativa do cálculo teórico uma aproximação bastante confiável e prática (EDWIGES et al., 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resíduos de bagaço de laranja (BL), Casca de maracujá (CM) e bagaço de caju (BC), apresentam pH ácido, sendo desfavorável a digestão anaeróbia, sendo necessário o uso do inóculo anaeróbio (lodo de esgoto) e alcalinizante (bicarbonato) para serem utilizados como substratos na digestão anaeróbia para obtenção de biogás para fins energéticos. Os resíduos de frutas apresentaram elevado teor de umidade e sólidos voláteis, sendo favorável para digestão anaeróbia desses resíduos assim como boa disponibilidade de nutrientes (C, N) e relação C/N variando de 28 a 51. O bagaço de caju obteve teor de fibras (lignina, hemicelulose e celulose) elevado sendo considerado um resíduo de mais difícil degradação em comparação aos outros estudados (BL e CM), sendo necessário a utilização de algum tipo pré-tratamento (químico, físico, biológico) para sua utilização como substrato na digestão anaeróbia.

A caracterização físico-química é uma alternativa de obtenção do PBM teórico em contraponto aos testes PBM em escala de laboratório, com custo, velocidade de resposta menores mantendo elevada confiabilidade dos resultados para dimensionamento de projetos de valorização energética de resíduos da agroindústria.

REFERÊNCIAS

ABUD, A. K. S.; ARAÚJO, M. L.; ALMEIDA, R. M. R. G. Uso do resíduo de laranja lima e da casca de coco verde na produção de enzimas. **Scientia Plena**, v. 11, n. 10, p. 1–8, 2015.

ALVES, J. L.; TRINDADE, E. O. D.; DA SILVA, J. C.; MUMBACH, G.D., ALVES, R. F., BARBOSA, J. M.; SENA, R. F. D. Lignocellulosic residues from the Brazilian juice processing industry as novel sustainable sources for bioenergy production: preliminary assessment using physicochemical characteristics. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 31, p.1939-1948, 2020.

ANTWI, E.; LEKCHIRI, S.; ENGLER, N.; LATRACHE, H.; NELLES, M.; SCHÜCH, A. **Agro waste management strategies in low income countries – future Perspectives to use waste as a Resource**. Proceedings Sardinia 2017 / Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2017.

CALABRÒ, P. S.; PONTONI, L.; PORQUEDDU, I.; GRECO, R.; PIROZZI, F.; MALPEI, F. Effect of the concentration of essential oil on orange peel waste biomethanization: Preliminary batch results, **Waste Management**, Oxford, v. 48, p. 440- 447, 2015.

CALABRÒ, P.S.; PANZERA, M. F. Biomethane production tests on ensiled orange peel waste. **Thermal Science and Engineering Progress**, [s.l], v. 35, n. 1, p.130-136, 2017.

CARVALHO, A.; R. FRAGOSO, R.; J. GOMINHO, J.; E. DUARTE, E.; Effect of Minimizing d-Limonene Compound on Anaerobic Codigestion Feeding Mixtures to Improve Methane Yield. **Waste Biomass Valor**, [s.l], p. 1-9, 2017.

CUI, Y.; DONG, X.; TONG, J.; LIU, S. Degradation of Lignocellulosic Components in Un-pretreated Vinegar Residue Using an Artificially Constructed Fungal Consortium. **BioResources**, [s.l], v.10, n. 2, p. 3434-3450, 2015.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. An Introduction. Wiley-VCH, 2008.

DEUS, G. I.; SILVA, M. S.; SOUZA, M. S.; SANTIAGO R. A. C.; LU, D. L. Efeitos da temperatura de secagem nos teores de compostos cianogênicos totais da casca de maracujá. **Alimentação humana**, [s.l], v. 20, n. 2, p. 67-74, 2014.

DO NASCIMENTO FILHO, W. B.; FRANCO, C. R. Avaliação do Potencial dos Resíduos Produzidos através do Processamento agroindustrial no Brasil. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 6, p. 1968–1987, 2015.

DOLLHOFER, V.; PODMIRSEG, S. M.; CALLAGHAN, T. M.; GRIFFITH, G. W.; FLIEGEROVÁ, K. Anaerobic Fungi and Their Potential for Biogas Production. **Biogas Science and Technology**, [s.l.], v. 151, p. 41-61, 2015.

EDWIGES, T.; FRARE, L.; MAYER, B.; LINS, L.; TRIOLO, J. M.; FLOTATS, X.; COSTA, M. S. S. M. Influence of Chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Manag.** V. 71, p. 618-625, 2018.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FRN). **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5ª edição, Gülzow, Alemanha, 2013.

FORSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L. I. Anaerobic digestion of municipal solid wastes: Dry thermophilic performance. **Bioresource Technology**, Essex, v. 99, p. 8180-8184, 2008.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistêmico de produção agrícola**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 06 mai. 2019.

INFANTE, J.; SELANI, M. M.; TOLEDO, N. M. V.; SILVEIRA-DINIZ, M. F.; ALENCAR, S. M.; SPOTO, M. H. F. Atividade antioxidante de resíduos agroindustriais de frutas tropicais. **Brazilian Journal of Food Nutrition.**, Araraquara, v. 24, n. 1, 2013.

JESUS, O. N.; SOARES, T. L.; GIRARDI, E. A.; ROSA, R. C. R.; OLIVEIRA, E. J.; NETO, A. J. C.; SANTOS, V. T.; OLIVEIRA, J. R. P. Evaluation of intraspecific hybrids of yellow passion fruit in organic farming. **African Journal of Agricultural Research**, [s.l.], v. 11. n. 24, p. 2129-2138, 2016.

LEITÃO, R. C.; CLAUDINO, R. L.; ALEXANDRE, L.C.; CASSALES, A. R.; PINTO, G. A. S.; SANTAELLA, S. T. **Produção do biogás a partir do bagaço de caju**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2011.

LIU, T. P. S. L.; PORTO, T. S.; MOREIRA, K. A.; TAKAKI, G. M. C.; BRANDÃO-COSTA, R.; HERCULANO, P.N.; PORTO, A. L. F. Tannase production by *Aspergillus* spp. UCP1284 using cashew bagasse under solid state fermentation. **African Journal of Microbiology Research**, [s.l.], v.10, n.16, p. 565-571, 2016.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012.

MEDEIROS, H. H. B. R. **Fracionamento do Óleo de Laranja utilizando um Sistema Híbrido de Evaporação.** 2014. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

MARTÍN, M. A.; SILES, J. A.; CHICA, A.F.; MARTÍN, A. Biomethanization of orange peel waste. **Bioresource Technology**, Essex, v. 101, p. 8993–8999, 2010.

NIKIEMA, M.; SOMDA, M. K.; SAWADOGO, J. B.; DIANOU, D.; TRAORÉ, A.S.; OUATTARA, A. S. Valorization of Agricultural Waste: Theoretical Estimation and Experimental Biomethane Yield from Cashew Nut Hulls. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**, v. 10, n. 4, p. 113, 2020.

OROZCO, R. S.; HERNÁNDEZ, P. B.; MORALES, G. R.; NUÑEZ, F. U.; VILLAFUERTE, J. O.; LUGO, V. L.; RAMÍREZ, N. F.; DÍAZ, C. E.B.; VÁZQUEZ, P. C. Characterization of lignocellulosic fruit waste as an alternative feedstock for bioethanol production. **BioResource**, [s.l.], v. 9, p. 1873-1885, 2014.

PRABHUDESSAI, V.; GANGULY, A.; MUTNURI, S. Biochemical Methane Potential of Agro Wastes. **Journal of Energy**, v. 7, p. 1-8, 2013.

RAMOS-IBARRA, J. R.; MIRAMONTES, C.; ARIAS, A.; ARRIOLA, E.; GUATEMALA, G.; CORONA-GONZÁLEZ, R. I. Production of hydrolytic enzymes by solid-state fermentation with new fungal strains using orange by-products. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, [s.l.], v. 16, n. 1, p. 19-31, 2017.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio.** 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru.

SANTOS, L. A. **Potencial de geração de biogás a partir de resíduos agroindustriais de frutas.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SANTOS, L. A.; VALENCA, R. B.; DA SILVA, L. C. S.; DE BARROS HOLANDA, S. H.; DA SILVA, A. F. V.; JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, A. F. M. S. Methane generation potential through anaerobic digestion of fruit waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120389, 2020.

SANTOS, L. A.; SILVA, T. H. L.; DE MELO OLIVEIRA, C. R., JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, A. F. M. S. Silage as a pre-treatment of orange bagasse waste to increase the potential for methane generation. **Science of The Total Environment**, v. 823, p. 153613, 2022.

SERPA, F. J.; DE SOUSA SILVA, J.; REIS, C. L. B.; MICOLI, L.; SILVA, L. M. A.; CANUTO, K. M.; ROCHA, M. V. P. Extraction and characterization of lignins from cashew apple bagasse obtained by different treatments. **Biomass and Bioenergy**, v. 141, p.105728,

2020.

SIDDIQUE, M. N. I.; WAHID, Z. A. B. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. **Journal of cleaner production**, v. 194, p. 359-371, 2018.

SILES, J. A.; VARGAS, F.; GUTIÉRREZ, M.C.; CHICA, A. F.; MARTÍN, M. A. Integral valorisation of waste orange peel using combustion, biomethanisation and co-composting Technologies. **Bioresource Technology**, Essex, v. 211, p. 173-182, 2016.

SILVA, C. E. F. **Avaliação do potencial de uso de resíduos do processamento de frutas na produção de etanol 2G**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

SILVA, A. M.; OLIVEIRA, R. L.; RIBEIRO, O. L.; BAGALDO, A. R.; BEZERRA, L. R.; SHEL, M. S.; MUNIZ, E. P.; PROVETI, J. R. C.; PORTO, P. S. S. Secagem e Extração de Pectina do Albedo Da Casca de Laranja. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, p. 8–11, 2014.

SOUZA, O.; FISCHER, G. A. A.; SOUZA, E. L.; SELIN, N.; MARANGONI, C. Produção de biogás a partir de resíduo agrícola da bananicultura. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS, 3., 2013, São Pedro. **Anais [...]** São Pedro-SP, 2013. p. 5.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 19^o edition, 1995. **APWA; AWWA; WPCF**, Washington.

STATISTA, **Global-top-producers-of-selected-fresh-fruit-worldwide**. 2022. Disponível em: Global leading producers of fresh fruit worldwide 2020 | Statista. Acesso em: 02 de jul de 2022.

TAGHIZADEH-ALISARAEIA, A.; HOSSEINIA, S. H.; GHOBADIANB, B.; MOTEVALIC, A. Biofuel production from citrus wastes: A feasibility study in Iran. **Renewable and Sustainable Energy**, [s.l.], v. 69, p. 1100-1112, 2017.

USDA- United States Department of Agriculture. **Citrus: World Markets and Trade**. Washington, 2019.

TYAGI, V. K.; FDEZ-GÜELFO, L. A.; ZHOU, Y.; ÁLVAREZ-GALLEGO, C. J.; GARCIA, L. I. R.; WUN, J. N.G. Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, p. 380–399, 2018.

WHO - International Reference Center for Waste Disposal. **Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost**. Suíça. 1978.

VALENTINO, F., GOTTARDO, M., MICOLUCCI, F., PAVAN, P., BOLZONELLA, D.,

ROSSETTI, S., & MAJONE, M. Organic fraction of municipal solid waste recovery by conversion into added-value polyhydroxyalkanoates and biogas. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 12, p. 16375-16385, 2018.

VAN SOEST, P. J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2.ed. Ithaca: Cornell University Press/Constock Publish, 1994. 476p.

ZHAO, C.; YAN, H.; LIU, Y.; HUANG, Y.; ZHANG, R.; CHEN, C.; LIU, G. Bio-energy conversion performance, biodegradability, and kinetic analysis of different fruit residues during discontinuous anaerobic digestion. **Waste Management**, Oxford, v. 52, p. 295–301, 2016.

ZHENG, Y.; ZHAO, J. J.; XU, F.; LI, Y. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogás Production. **Progress in Energy and Combustion Science**, [s.l.], v. 42, p. 35-53, 2014.