

**IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL METANOGÊNICO DE TRÊS DIFERENTES
SUBSTRATOS ORGÂNICOS GERADOS NA PRODUÇÃO DE MOSCA SOLDADO
PARA VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XII-002>**Johanna Díaz Umaña (*), Ana Clara da Costa de Norões Milfont, Larissa Maria Silveira Pereira, e Thiago Edwiges*** Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Instituto Nacional de Aprendizaje (INA)
johanna.du@gmail.com**RESUMO**

Esta pesquisa teve como objetivo realizar a identificação do potencial de metano de três substratos orgânicos: líquido, pastoso e sólido, gerados no processo de produção da larva da mosca-soldado *Hermetia Illucens* da empresa ProNuvo, localizada em Pococí Costa Rica, como estratégia de bioeconomia para valorização de resíduos. A pesquisa incluiu como primeira etapa o balanço de massa do processo de produção da mosca-soldado, para determinar as quantidades de resíduos gerados, obtendo-se que: os substratos líquido e pastoso e, as águas de limpeza misturadas somam entre 6 e 10 toneladas por semana e, o substrato sólido ou leito seco corresponde aproximadamente entre 30,6 a 48,4 toneladas/semana; considerando que há matéria-prima suficiente para uma possível produção de biogás. A partir da segunda etapa, a caracterização dos substratos obteve-se que: o substrato líquido apresentou valores de 61,6% SV/ST e uma relação C/N de 37,1, o substrato pastoso apresentou valores de 82,6% SV/ST e uma C/N de 25,1 e substrato sólido apresentaram valores de 84,7% SV/ST e relação C/N de 12,9. A última etapa, a análise do potencial de metano foi realizada através de um teste em escala laboratorial em reatores tipo batelada, utilizando como guia o padrão alemão VDI 4630 (2016) e os valores obtidos a partir da determinação do potencial de metano dos três substratos foram: 200 ± 5 LN CH₄ / kg VS⁻¹ d⁻¹ para o substrato líquido, 340 ± 3 LN CH₄ / kg VS⁻¹ d⁻¹ para o substrato pastoso e 125 ± 4 LN CH₄ / kg VS⁻¹ d⁻¹ para o substrato sólido. Sendo o substrato pastoso o que apresenta melhor potencial de metano, seguido do substrato líquido e por último do substrato sólido. Os valores obtidos para o percentual de metano no biogás nos três substratos são: 46,1% para o substrato líquido, 41,2% para o substrato pastoso e 37,4% para o substrato sólido. Finalmente, determina-se que pelo menos um dos resíduos orgânicos analisados (substrato pastoso) possui um elevado potencial metanogênico (340 ± 3 LN CH₄ / kg VS⁻¹ d⁻¹) em comparação com os outros dois substratos, portanto sua valorização energética poderia ser viável.

PALAVRAS-CHAVE: Potencial Metanogênico, Biogás, Valorização, Resíduos orgânicos, Mosca-soldado**ABSTRACT**

The objective of this research was to identify the methane potential of three organic substrates: liquid, pasty and solid, generated in the production process of the larvae of the soldier fly *Hermetia Illucens* by company ProNuvo, located in Pococí, Costa Rica as a bioeconomy strategy for waste valorization. The research included, as a first step, the mass balance of the soldier fly production process, to determine the quantities of waste generated. It was found that: the liquid and pasty substrates and the mixed cleaning waters total between 6 and 10 tons per week and the solid substrate or dry bedding corresponds to approximately between 30,6 and 48,4 tons/week; considering that there is sufficient raw material for a possible production of biogas. From the second stage, the characterization of the substrates, it was obtained that: the liquid substrate presented values of 61,6% SV/ST and a C/N ratio of 37,1, the pasty substrate presented values of 82,6% SV/ST and a C/N of 25,1 and the solid substrate presented values of 84,7% SV/ST and a C/N ratio of 12,9. The last stage, the analysis of the methane potential was performed through a laboratory-scale test in batch-type reactors, using the German standard VDI 4630 (2016) as a guide and the values obtained from the determination of the methane potential of the three substrates were: 200 ± 5 LN CH₄ / kg VS⁻¹ d⁻¹ for the liquid substrate, 340 ± 3 LN CH₄ / kg VS⁻¹ d⁻¹ for the pasty substrate and 125 ± 4 LN CH₄ / kg VS⁻¹ d⁻¹ for the solid substrate. The pasty substrate is the one with the best methane potential, followed by liquid substrate and finally solid substrate. The values obtained for the percentage of methane in the biogas in the three substrates are: 46,1% for the liquid substrate, 41,2% for the pasty substrate and 37,4% for the solid substrate. Finally, it is determined that at least one of the organic residues analyzed (pasty substrate) has a high methanogenic potential (340 ± 3 LN CH₄ / kg VS⁻¹ d⁻¹) compared to the other two substrates, therefore its energy valorization could be viable.

KEY WORDS: Methanogenic Potential, Biogas, Valorization, Organic Waste, Soldier Fly.

INTRODUÇÃO

A empresa ProNuvo, localizada no bairro La Rita de Pococi de Limón, Costa Rica, produz a larva da mosca-soldado *Hermetia Illucens*, para a produção de diversos produtos, como: proteína em pó, óleo ou larva seca, que pode ser utilizada como suplemento ou na formulação de ração animal ou pet e também, fertilizante com alto teor de nutrientes (Potássio, Nitrogênio e Fósforo, NKP).

O processo de alimentação das larvas, que dura 14 dias, é a principal etapa do ciclo produtivo, em que a larva aumenta de peso 10 mil vezes. A produção de uma tonelada de proteína a partir da larva é um processo sustentável, comparado a outros processos de produção de proteína (animal ou vegetal), pois reduz os impactos ambientais ao reduzir o ciclo de produção para 15 dias, utilizando um espaço de 300 m² (produção vertical) e um volume de 10 m³ de água. O substrato com que a larva se alimenta é composto por frutas e vegetais, e principalmente restos de bananeira, aproximadamente 1 a 3 toneladas por semana, que é composto por cascas, pseudocaule, folhas e râquis. Esses resíduos, que representam 67% do total da biomassa produzida (Villalobos, 2018), são gerados nas plantações e unidades de processamento próximas à empresa.

A mosca-soldado *Hermetia Illucens* é nativa da América, porém atualmente está distribuída pelo mundo, considerando temperaturas ótimas para sua propagação entre 25 a 30 °C (Singh, 2019; Bermúdez, 2023). A mosca adulta é alongada, preta, marcante e grande em comparação com a mosca doméstica, podendo atingir um tamanho entre 10 e 25 mm (Singh, 2019; Bermúdez, 2023). As fêmeas são menos alongadas que os machos e possuem asas alongadas de cor iridescente ou marrom (Bermúdez, 2023). O ciclo de vida pode durar de 20 a 35 dias e é dividido em cinco fases: ovos, larvas, pupas, pré-pupas e adultos (Singh, 2019). Porém, a variação de fatores como temperatura, umidade relativa e a umidade da dieta que recebem no estado larval, podem afetar a duração do ciclo de vida, estendendo-se até meses (Bermúdez, 2023).

Entre as vantagens que esses insetos apresentam estão: não é considerada espécie vetora ou praga porque não representa ameaça a outros organismos, uma vez que a mosca adulta não possui aparelho bucal, sistema digestivo ou ferrão (Singh, 2019; Bermúdez, 2023); não têm afinidade com o corpo humano, animais ou alimentos frescos (Bermúdez, 2023); os adultos não voam bem, por isso tendem a pousar na vegetação a maior parte do dia (Singh, 2019); realizam o controle biológico limitando a oviposição da mosca doméstica e, portanto, reduzindo o número de larvas que produz (Bermúdez, 2023).

Diener et al. (2011) e Singh (2019) definem a digestão de resíduos orgânicos por larvas de mosca-soldado como uma solução tecnológica CORS (por sua sigla em inglês: Conversion of Organic Waste by Saprófagos), porque consegue combinar a compostagem de resíduos, a recuperação de nutrientes e a geração de renda com sua aplicação. Este processo de digestão de resíduos é uma alternativa de baixo custo, fácil manutenção e operação, com baixa pegada ecológica e com potencial econômico mais adaptado do que qualquer outra técnica de compostagem. (Singh, 2019). A mosca-soldado pode ser vista como um agente ecológico e eficiente no tratamento e redução do volume/peso de uma grande variedade de resíduos orgânicos. Isto é conseguido devido ao apetite voraz que a mosca tem no seu estado larval, o que facilita a transformação de grandes quantidades de resíduos orgânicos em biomassa (Singh, 2019).

Os resíduos a utilizar podem ser materiais de origem vegetal e animal em decomposição, pelo que diferentes estudos mostram a utilização de: frutas em decomposição (cascas de banana e restos de maçã) e vegetais (alface, batata), resíduos alimentares de restaurantes, resíduos de produção de cerveja, laticínios resíduos, ração para cães, aves, estrume de porco ou vaca, lamas primárias e secundárias de estações de tratamento de águas residuais e até excrementos humanos frescos (Lalander et al. 2019; Singh, 2019).

A mosca soldado possui alta capacidade de bioconversão de resíduos orgânicos em proteína animal, tanto que alguns autores (Diener et al., 2011; Singh, 2019) indicam que o processo de bioconversão: a biomassa pré-pupal representa 7,7%, 33% dos resíduos gerados, correspondentes aos leitos de alimentação das larvas, podem ser utilizados como fertilizante, as pré-pupas contêm em média 44% de proteína bruta e 33% de gordura; e as larvas podem apresentar teor de proteína entre 33% a 58%, teor de gordura pode variar entre 15% e 41%, teor de cálcio entre 4,8% e 5,11% e teor de fósforo em torno de 0,6%. Devido a essas características, a mosca-soldado torna-se um bom insumo com alto teor nutricional para alimentação animal, sendo comercializada como larvas vivas, em pó ou assadas (Bermúdez, 2023).

A digestão anaeróbia é um processo de transformação bioquímica que permite o tratamento de diversos resíduos orgânicos, na ausência de oxigênio e com a participação de um consórcio de microrganismos específicos para conseguir a degradação e estabilização da matéria orgânica, obtendo dois produtos: um produto gasoso denominado biogás, composto principalmente por Metano (50%-75%) e Dióxido de Carbono (25%-50%), que é rico energeticamente, permitindo seu uso como substituto de fontes de energia fóssil e um produto sólido, rico em nutrientes, denominado digestato que pode ser utilizado como biofertilizante (Raposo et al., 2011; Yi Zheng et al., 2014). Esta tecnologia é adequada para o tratamento de substratos orgânicos como: águas residuais e efluentes industriais, estrume animal incluindo vacas, porcos e aves, resíduos de frutas e vegetais, resíduos alimentares domésticos, resíduos agrícolas, pastagens, madeira, ervas daninhas terrestres e aquáticas, culturas energéticas, entre outros (Raposo et al., 2011; Edwiges et al., 2018).

O processo de digestão anaeróbica da matéria orgânica é realizado através de quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Edwiges et al., 2019). Na etapa de hidrólise, polímeros orgânicos complexos como proteínas, carboidratos e

lipídios são decompostos em aminoácidos, ácidos graxos de cadeia longa e açúcares, pela ação de enzimas extracelulares produzidas por microrganismos hidrolíticos. Na segunda etapa da acidogênese, as bactérias fermentativas são responsáveis por converter as moléculas obtidas na etapa anterior em uma mistura de ácidos graxos voláteis (AGV) e outros compostos menores, como os álcoois. No terceiro estágio, as bactérias acetogênicas convertem moléculas de AGV em moléculas menores, como acetato, dióxido de carbono e/ou hidrogênio. Finalmente, esses compostos são os substratos utilizados na metanogênese para a produção de metano. (Yi Zheng et al., 2014). Na Figura 3 são apresentadas as etapas da digestão anaeróbica.

No processo de produção de biogás é necessário considerar diversos parâmetros físico-químicos, que devem ser medidos e controlados para evitar efeitos negativos ou inibitórios durante o processo, como: o controle da temperatura é de grande importância, pois dela dependem processos biológicos. Quando há aumento da temperatura, há aumento na velocidade de reação e na taxa de crescimento dos microrganismos, acelerando o processo de digestão (Varnero, 2011). A faixa de temperatura mais utilizada é a mesófila (20-45 °C), pois é considerada condições mais estáveis por reduzir os sólidos voláteis SV e proporcionar baixas concentrações de AGV, segundo diferentes autores, considera-se que a temperatura ideal está entre 30-37°C (Venegas, 2013); os microrganismos metanogênicos tendem a ter um pH ótimo entre 7 e 8, enquanto as bactérias acidogênicas geralmente têm um pH ótimo mais baixo, sendo considerado um pH ótimo entre 6,5 e 7,5 para digestão anaeróbica, porém, se os substratos a serem utilizados apresentarem pH muito baixo ou superior a 8, haverá ação inibitória do processo (Raposo et al., 2011; Venegas, 2013). Para evitar esta situação, deve-se controlar a alcalinidade ou capacidade tampão, que é produzida principalmente pela presença de compostos como bicarbonato, carbonato e hidróxidos, que neutralizam os ácidos, gerando resistência às mudanças rápidas de pH devido à formação de ácidos (Raposo et al., 2011); para as bactérias metanogênicas a relação C/N Carbono-Nitrogênio é importante porque são as principais fontes de alimento, pois constituem a fonte de energia (Carbono) e o insumo para a formação celular (Nitrogênio). Uma relação C/N ideal para digestão anaeróbica pode estar entre 15:1 e 30:1. Se a relação C/N for inferior a 8:1, a atividade bacteriana é inibida devido ao excesso de amônio, que, sendo tóxico, inibe o processo. (Varnero, 2011; Venegas, 2013); e o sólidos totais ST é a fração sólida presente em uma amostra de matéria orgânica, e o conteúdo desses sólidos está relacionado à mobilidade das bactérias metanogênicas dentro do substrato, de forma que quanto maior o teor de ST, menor será a mobilidade e, portanto, menos eficiente e menor será a produção de biogás (Varnero, 2011). Os sólidos voláteis SV, contêm os compostos orgânicos que devem ser convertidos em metano, portanto, quanto maior o teor de SV, maior a probabilidade de produção de metano (Varnero, 2011).

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo identificar o potencial metanogênico de três diferentes substratos: líquido, pastoso e sólido, gerados durante a produção da larva da mosca-soldado *Hermetia Illucens* na empresa ProNuvo, localizada na Costa Rica. Para realizar esta investigação, primeiramente foi realizada a descrição da planta de produção do ProNuvo, realizando o balanço de massa. Posteriormente, foram caracterizados os três principais substratos gerados no processo e estimado o potencial metanogênico, obtido em testes em lote.

METODOLOGIA

Descrição do processo de produção da larva da mosca soldado *Hermetia Illucens*

Foram realizadas três reuniões virtuais com Lisbeth Chaves, engenheira de produção, e uma visita para um tour pelas instalações da fábrica da ProNuvo, para identificar as diferentes etapas do processo produtivo da larva da mosca-soldado *Hermetia Illucens*. Com as informações coletadas dos processos e dos diferentes fluxos de entradas e saídas, é realizada a quantificação dos materiais e insumos consumidos e dos produtos, subprodutos e resíduos gerados. A partir dessa quantificação e com cálculos matemáticos, é realizado o balanço de massa do processo e criado o fluxograma do processo de produção da larva da mosca-soldado *Hermetia Illucens* na planta ProNuvo.

Caracterização de substratos: líquidos, pastosos e sólidos

Para a caracterização dos substratos orgânicos, em abril de 2024, foi retirada uma amostra de um litro de cada um dos três substratos gerados no processo produtivo da empresa ProNuvo. As amostras foram mantidas à temperatura de 4 °C, para serem transportadas e armazenadas nesta mesma temperatura até sua análise. As amostras foram transferidas para o Laboratório de Águas Residuais do INA, no Centro Plurissetorial de Heredia. Em laboratório, foi realizado um pré-tratamento de secagem em estufa da marca Biobase, à temperatura constante de 60°C, por um período de 48 horas. Após o processo de pré-tratamento, as amostras foram extraídas e pulverizadas, para serem acondicionadas em sacos plásticos lacrados. O primeiro substrato consistiu em um lixiviado líquido proveniente da decomposição de resíduos orgânicos armazenados. O segundo substrato foi composto por resíduos de lixiviado e nutrientes para preparo da torta

úmida para preparo dos leitos de mosca-soldado, portanto possui textura pastosa. E o terceiro substrato foi o leito seco da mosca-soldado com larvas mortas, portanto é um substrato sólido.

Em maio de 2024 foi realizada uma viagem para Medianeira, Brasil e são transportados os substratos orgânicos em pó, para início dos trabalhos de caracterização físico-química no Laboratório de Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Para isso foi realizada a análise dos parâmetros: pH, sólidos totais e voláteis, nitrogênio total Kjeldahl, carbono orgânico total, relação voláteis/ totais SV/ST e relação carbono/ nitrogênio C/N (APHA, 2007). A determinação do carbono orgânico total foi realizada aplicando-se a equação 1, dada por Inter-Departmental Committee on Utilization of Organic Wastes (1951), conforme citado em Falcón et al. (1987), em que o valor é calculado a partir do percentual de cinzas obtido na análise do teor de sólidos voláteis, através da relação:

$$\% \text{ Carbono orgânico total} = \frac{100 - \% \text{ Cinzas}}{1,8} \quad \text{equação (1)}$$

Estimativa experimental do potencial metanogênico

A determinação do potencial de metano dos três substratos: líquido, pastoso e sólido, foi realizada através de teste em escala laboratorial em reatores bateladas e utilizando como guia a norma alemã VDI 4630 (2006) para testes para determinação da produção de biogás a partir de materiais orgânicos e produção de gás residual após digestão anaeróbica.

Para a realização do teste foram preparados um total de nove reatores de vidro de 120 ml de volume, cada amostra incluía um dos substratos caracterizados (líquido, pastoso e sólido) e o inóculo, preparado em triplicata. Além disso, três reatores de vidro contendo apenas inóculo foram preparados como ensaios de controle. O inóculo utilizado foi obtido nas unidades de demonstração mesófilas do Centro Internacional de Energias Renováveis localizadas no oeste do Paraná, Brasil. Além disso, três reatores de vidro adicionais foram incluídos com o inóculo e celulose microcristalina (Sigma-Aldrich, 20 lm de diâmetro), como substrato de composição química conhecida, como amostra de referência. Finalmente, obtendo-se um sistema de 18 reatores de vidro preparados ao mesmo tempo.

Cada reator de teste foi preparado com 59 g de inóculo e menos de 1 g de amostra. Para cada ensaio, os dados de massa foram registrados e a produção de gás relacionada ao inóculo foi subtraída para cada reator. O gás nitrogênio foi utilizado para eliminar o ar contido nos reatores, conseguindo uma atmosfera livre de oxigênio. O sistema reator foi mantido em uma incubadora com temperatura controlada de 37°C por 31 dias, momento em que a produção diária representou menos de 1% do total acumulado de gás produzido. Os reatores de vidro foram agitados manualmente, uma vez ao dia, antes de registrar o volume diário de biogás produzido. Uma vez obtidos os dados acumulados de medição do volume de biogás, estes são normalizados para condições normais de temperatura e pressão (CNTP), com a equação 2 (DIN 38414, 1985):

$$V_0 = V * \frac{(P_L - P_W) * T_0}{P_0 * T} \quad \text{equação (2)}$$

Donde:

V_0 é o volume de biogás em condições normalizadas, ml

V é o volume de metano obtido no teste PBM, ml

P_L é a pressão atmosférica, mbar

P_W é a pressão do vapor de água em função da temperatura ambiente, mbar

T_0 é a temperatura normal, ou seja, 273K

P_0 é a pressão normal, ou seja 1013 mbar

T é a temperatura do reator ou o do ambiente, K

O teor de metano foi medido utilizando um cromatógrafo gasoso, Clarus 680, Perkin Elmer, até o volume acumulado de biogás corrigido. E por fim, foi representado graficamente o resultado esperado da produção acumulada e diária de biogás para os três substratos e, além disso, foi determinado o potencial metanogênico de cada um dos substratos estudados.

RESULTADOS

Processo de produção de larva de mosca soldado *Hermetia Illucens*

O processo de produção da mosca-soldado na empresa ProNuvo, ver figura 1, dura aproximadamente 25 a 30 dias, o que tem como foco gerar as condições-chave para que um maior número de insetos complete seu ciclo de vida total ou parcialmente, de acordo com as diferentes etapas necessárias.

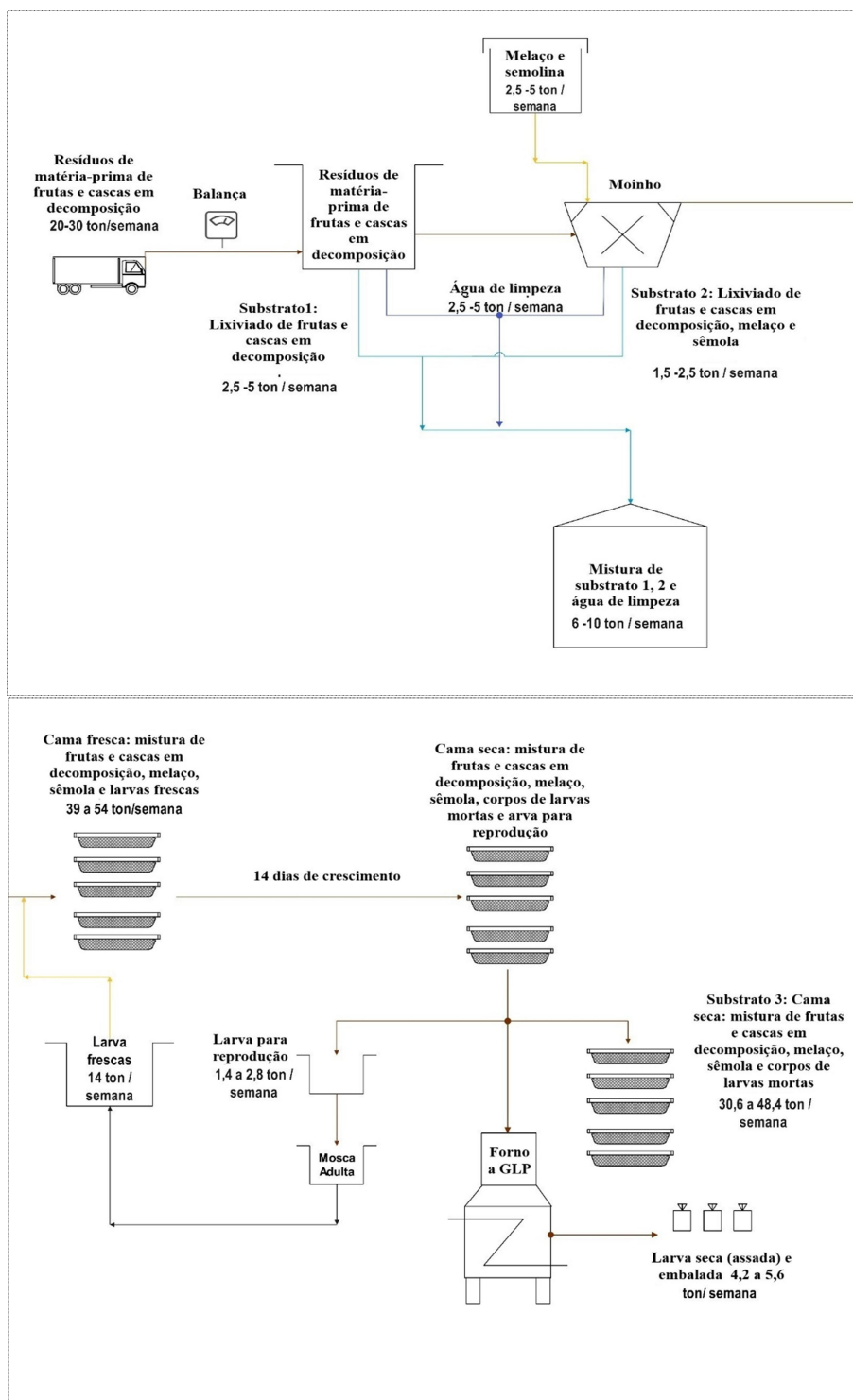


Figura 1. Fluxograma do processo de produção no ProNuvo. Fonte: Autor do Trabalho.

O processo inicia-se com a recolha dos resíduos orgânicos, preferencialmente isentos de agroquímicos, nas imediações da área geográfica, sendo posteriormente armazenados durante um período máximo de 24 a 48 horas, uma vez que as condições climáticas de temperatura e umidade da zona favorecem a fácil degradação desses resíduos, gerando assim o primeiro substrato de interesse da pesquisa, que corresponde ao lixiviado proveniente da decomposição desses resíduos armazenados e à água de lavagem da superfície do solo. Estima-se que semanalmente sejam recolhidas entre 20 e 30 toneladas de resíduos orgânicos (ver tabela 1), principalmente cascas e resíduos de banana, ananases danificados e outros resíduos como mandioca, batata doce e outros tubérculos.

Posteriormente, os resíduos orgânicos são triturados num moinho, onde são misturados principalmente com sêmola e melaço (entre 2,5 e 5 toneladas por semana), alguns nutrientes são integrados em quantidades muito baixas, permitindo complementar as dietas para promover o crescimento dos ovos, larva, pupa e pré-pupa (ver tabela 1). A partir disso, obtém-se uma mistura pastosa, que é utilizada para formar as camas para as larvas em bandejas plásticas de 1m². Nesta etapa é gerado o segundo substrato, composto pelos restos de materiais que caem ao solo provenientes do processo de moagem e formação dos leitos e da água utilizada na limpeza dos pisos, de modo que a textura desse substrato é pastosa.

Tabela 1. Balanço de massa do processo de produção de larvas de mosca-soldado. Fonte: Autor do Trabalho.

Fluxos (fluxograma)	Valores
Resíduos de matéria-prima de frutas e cascas em decomposição.	20 a 30 ton/ semana
Melaço e semolina	2,5 a 5 ton/semana
Substrato 1: Lixiviado de frutas e cascas em decomposição	2,5 a 5 ton / semana
Mistura de fruta e casca em decomposição, melaço e sêmola	25 a 40 ton / semana
Substrato 2: Lixiviado de frutas e cascas em decomposição, melaço e sêmola	1,5 a 2,5 ton / semana
Água de limpeza	2 a 2,5 ton / semana
Mistura de lixiviados de frutas e cascas em decomposição, melaço, sêmola e água de limpeza (mistura de substrato 1 e 2)	6 a 10 ton / semana
Cama fresca: mistura de frutas e cascas em decomposição, melaço, sêmola e larvas frescas	39 a 54 ton/ semana
Substrato 3: Cama seca: mistura de frutas e cascas em decomposição, melaço, sêmola e corpos de larvas mortas	30,6 a 48,4 ton / semana

Os substratos líquido e pastoso e a água de limpeza são coletados e armazenados em recipiente plástico afastado da área de processamento, acumulando entre 6 e 10 toneladas por semana (ver tabela 1). Este afluente é recolhido semanalmente por uma empresa externa, para prestar o serviço de tratamento e descarga, resultando num custo elevado de aproximadamente 11650,00 dólares por viagem por semana, pelo que é de grande interesse para a empresa conseguir uma valorização energética futura destes substratos para reduzir os custos de produção associados.

Larvas frescas de mosca-soldado são adicionadas para as camas, aproximadamente 14 toneladas por semana e armazenadas por um período de 14 dias, empilhadas em torres de no máximo 14 camas, em armazém com temperatura e umidade controladas por extratores e injetores de ar. Decorrido o tempo programado, as camas são desarmazenadas para extração da pré-pupa formada e separados entre 30% e 40% da pré-pupa ou larva adulta para secagem em estufas, aproximadamente entre 4,2 e 5,6 toneladas por semana e embaladas, para exportação como produto acabado. Algumas pré-pupas, entre 10% e 20%, são separadas para continuar o ciclo de crescimento para reprodução, então são levadas para estufas para que a mosca adulta ecloda, seja promovido o processo de reprodução e a postura de novos ovos, iniciando o processo de produção da mosca de novo. As quantidades manipuladas da mosca-soldado em suas diferentes etapas são apresentadas na tabela 2

Tabela 2. Balanço de massa: fluxos de larvas de mosca-soldado. Fonte: Autor do Trabalho.

Fluxos (fluxograma)	Valores
Larva fresca média	14 ton / semana
Larva para reprodução (10% a 20% de larva fresca)	1,4 a 2,8 ton / semana
Perda de larva (60% a 40% de larva fresca)	5,6 a 8,4 ton / semana

Caracterização de substratos: líquidos, pastosos e sólidos

Os substratos foram transportados da Costa Rica para o Brasil, no mês de maio, para realização de sua caracterização no Laboratório de Solos da UTFPR. Foi necessário que o substrato 1, líquido, e o substrato 2, pastoso, fossem submetidos a um pré-tratamento de secagem para facilitar seu acondicionamento e mobilização. Portanto, esses dois primeiros substratos apresentam teor de umidade menor (9,4% e 6,7%) que o substrato 3, sólido (18,2%) (ver tabela 3); sabendo-se que geralmente na literatura se verifica que frutas e vegetais e resíduos alimentares tendem a apresentar um elevado teor de umidade (Edwiges *et al.*, 2018).

A medição do pH foi realizada apenas para o substrato 3 (ver tabela 3), adicionando água a uma determinada massa do mesmo. No caso dos substratos 1 e 2, não foi possível realizar a medição porque estando no estado sólido e pulverizado era difícil de dissolver em água. O valor de pH do substrato 3 poderia ser considerado fora da faixa ideal de 6,5 e 7,5 para digestão anaeróbia, podendo ser um fator limitante no processo.

Os valores obtidos para a relação SV/ST (ver tabela 3) foram de 61,6% para o substrato 1, 82,6% para o substrato 2 e 84,7% para o substrato 3; apresentando o substrato 1, o menor potencial de biodegradabilidade e o substrato 3, o maior potencial de biodegradabilidade. Diferentes autores indicam valores de VS/ST para alimentos e frutas entre 87% e 92% (Solarte *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2009), portanto pode-se considerar que os dados da relação SV/ST apresentada pelos substratos analisados são inferiores aos observados em testes similares de digestão anaeróbia.

Tabela 3. Resultados da caracterização dos substratos do processo produtivo da larva da mosca-soldado. Fonte: Autor do Trabalho.

Substrato	Umidade (%)	ST ¹ (%)	SV ¹ (% bu)	SV/ST (%)	COT ¹ (% C)	NTK ¹ (% ST)	C/N ¹ (COT/% NTK)	pH
Substrato 1	9,4	90,7	55,9	61,6	36	1,0	37,1	--
Substrato 2	6,7	93,3	77,1	82,6	47	1,9	25,1	--
Substrato 3	18,2	81,8	69,3	84,7	49	3,8	12,9	8,8

¹ ST: sólidos totais, SV: sólidos voláteis, SV/ST: relação sólidos voláteis/ totais, COT: carbono orgânico total, NTK: nitrogênio total Kjeldahl, C/N: relação carbono/ nitrogênio,

Com relação aos valores obtidos a partir da relação C/N (ver tabela 3), recomenda-se que uma relação C/N ideal para digestão anaeróbica esteja entre 15:1 a 30:1. Portanto, pode-se considerar que o substrato 2, pastoso, possui uma proporção de 25,1 que é benéfica para alcançar o equilíbrio entre fontes de energia e nutrientes suficientes requeridos pelas bactérias para o seu crescimento, bem como para manter um ambiente estável. No caso do substrato 1, a relação C/N de 37,1 indica alto teor de carbono orgânico e, portanto, alto teor de carboidratos que favorecem a digestão anaeróbica. Porém, isso pode favorecer a rápida degradação dos carboidratos e com ela, uma alta produção de ácidos graxos voláteis, que podem gerar uma ação inibitória ao acumular e reduzir o valor do pH, afetando a etapa de metanogênese. No caso do substrato 3, a relação C/N de 12,9 está próxima do limite de 8, portanto pode haver ação inibitória devido à presença de excesso de amônia na digestão anaeróbia. (Prabhudessai *et al.* 2014; Liu *et al.*, 2009)

Estimativa experimental do potencial metanogênico

Os resultados da produção acumulada de biogás e do potencial metanogênico dos substratos são vistos na tabela 4, identificando que o substrato 2, pastoso, correspondente à mistura de chorume, sêmola, melaço e água, apresenta a maior produção acumulada de 825±8 LN biogás /kg SV⁻¹ (ver tabela 4), dobrando os valores da produção acumulada de biogás gerado pelo substrato 1 e substrato 3, e além disso, apresenta o maior valor de potencial metanogênico dos três substratos estudados com valor de 340±3 LN CH₄ /kg VS⁻¹ d⁻¹, e apresentou o segundo valor de percentual de concentração de metano no biogás, com valor de 41,2±6,2 (ver tabela 4).

Segundo o que alguns autores afirmam, a concentração de metano para resíduos orgânicos provenientes de alimentos, frutas e vegetais tende a apresentar valores mais elevados, entre 46,2% ou mesmo 76% (Solarte *et al.*, 2017; Prabhudessai *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2009), que os percentuais de metano obtidos pelos substratos analisados, que permaneceram entre os valores de 37,4% para substrato 3 e 46,1% para substrato 1 (ver tabela 4).

Da mesma forma, segundo alguns autores (Edwiges *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2009), o potencial metanogênico de substratos orgânicos pode apresentar valores muito variados, desde valores elevados como $518 \text{ LN CH}_4 / \text{kg VS}^{-1} \text{ d}^{-1}$ em resíduos alimentares e, valores inferiores como $124 \text{ LN CH}_4 / \text{kg VS}^{-1} \text{ d}^{-1}$ em resíduos de frutas e vegetais, estes últimos podem variar de acordo com o tipo de fruta ou vegetal presente em maior proporção. Portanto, pode-se indicar que o potencial metanogênico obtido pelos três substratos em análise apresenta resultados semelhantes aos investigados em outros testes similares (ver tabela 4).

Tabela 4. Resultados da produção acumulada de biogás e do potencial metanogênico dos substratos do processo produtivo da larva da mosca-soldado. Fonte: Autor do Trabalho.

Substrato	Produção Acumulada (LN biogás / kg VS ⁻¹)	Concentração de metano (%)	Potencial Metanogênico PBM (LN CH ₄ / kg VS ⁻¹ d ⁻¹)
Substrato 1	481,0±87	46,1±4,4	200±5
Substrato 2	825,0±8	41,2±6,2	340±3
Substrato 3	382,0±72	37,4±9,7	125±4

Ao revisar o gráfico na figura 2, pode-se identificar que os três substratos analisados atingem-na no prazo de 12 dias após a incubação, estabilização da produção de biogás (produção diária inferior a 1% do total de gás acumulado), pelo que se pode pensar que os substratos apresentam uma boa taxa de conversão de matéria orgânica em biogás; já que ao revisar estudos de substratos orgânicos semelhantes feitos por outros autores, são identificados valores máximos semelhantes de produção de biogás entre 1 e 5 dias e para a estabilização da produção de biogás são identificados 15 e até 22 dias. (Edwiges *et al.*, 2018; Solarte *et al.*, 2017)

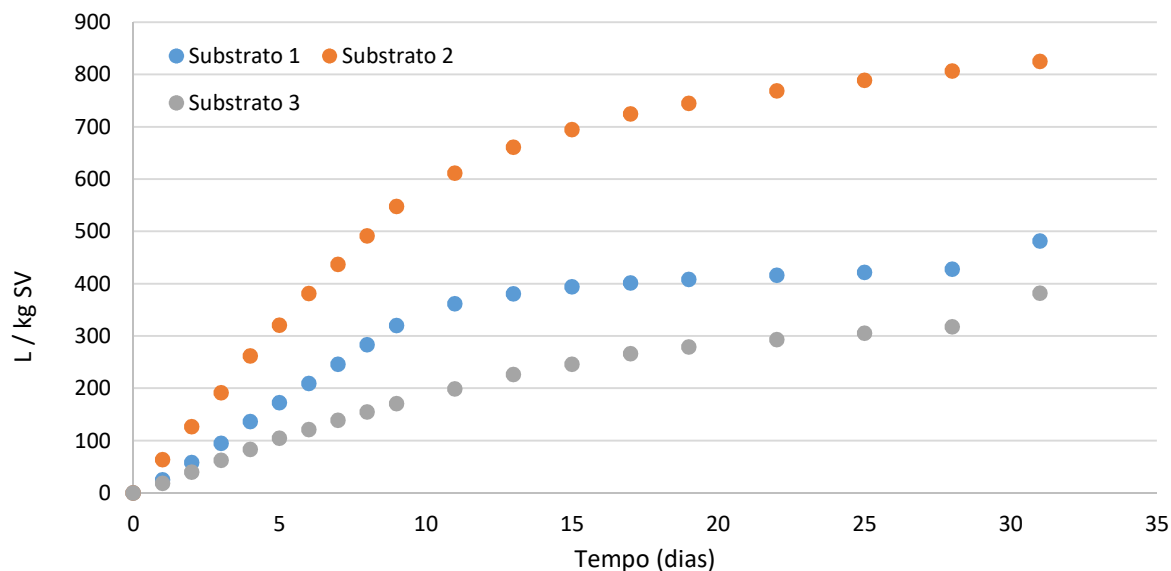


Figura 2. Produção acumulada de biogás a partir dos substratos do processo de produção de larvas de mosca-soldado. Fonte: Autor do Trabalho.

CONCLUSÕES

Os substratos líquido e pastoso e, as águas de limpeza misturadas somam entre 6 e 10 toneladas por semana, o que representa um custo de aproximadamente US\$ 11650,00 por semana para tratamento, pelo que é de grande interesse para a empresa conseguir uma valorização energética futura destes substratos para reduzir os custos de produção associados. O substrato sólido ou leito seco é gerado a cada 14 dias e corresponde aproximadamente entre 30,6 a 48,4 toneladas/semana, que às vezes é utilizado como corretivo de solo devido à presença de nutrientes. Da caracterização

dos substratos obtém-se que: o substrato líquido apresentou valores de 61,6% SV/ST e uma relação C/N de 37,11, o substrato pastoso apresentou valores de 82,6% SV/ST e uma C/N de 25,13 e substrato sólido apresentaram valores de 84,7% SV/ST e relação C/N de 12,9. Sendo o substrato 3 o que apresenta valores menos favoráveis à digestão anaeróbia. Os valores obtidos a partir da determinação do potencial de metano dos três substratos são: $200 \pm 5 \text{ LN CH}_4 / \text{kg VS}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para o substrato líquido, $340 \pm 3 \text{ LN CH}_4 / \text{kg VS}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para o substrato pastoso e $125 \pm 4 \text{ LN CH}_4 / \text{kg VS}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para o substrato sólido. Sendo o substrato 2 o que apresenta melhor potencial de metano, seguido do substrato 1 e por último do substrato 3. Os valores obtidos para o percentual de metano no biogás nos três substratos são: 46,1% para o substrato líquido, 41,2% para o substrato pastoso e 37,4% para o substrato sólido. Finalmente, determina-se que pelo menos um dos resíduos orgânicos analisados (substrato 2 pastoso) possui um elevado potencial metanigênico ($340 \pm 3 \text{ LN CH}_4 / \text{kg VS}^{-1} \text{ d}^{-1}$) em comparação com os outros dois substratos, portanto sua valorização energética poderia ser viável.

REFERÊNCIAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, & WATER ENVIRONMENT FEDERATION. (2007). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** (23er edition).
2. DIN. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. 38414: **Determination of the amenability to anaerobic digestion**. In: DIN, Berlin, Germany, 1985.
3. BERMÚDEZ-SERRANO, I. M.; SÁNCHEZ-VELÁZQUEZ, O. **Comprehensive Utilization of the Black Soldier Fly: Bioconversion**. Sustainability, and Emerging Challenges. Scientia agropecuaria. 2023, v. 14, n. 4, p. 571-590. Disponível em: <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/5244>. Acesso 18 abril 2024.
4. DIENER, S. *et al.* **Biological Treatment of Municipal Organic Waste Using Black Soldier Fly Larvae**. Waste and biomass valorization. 2011, v. 2, n. 4, p. 357-363. Disponível em: https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A8803/datastream/PDF/Diener-2011-Biological_treatment_of_municipal_organic-%28published_version%29.pdf. Acesso 18 abril 2024.
5. EDWIGES, T. *et al.* **Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste**. Waste Management. 2018, v. 71, p. 618-625. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17303574>. Acesso 17 março 2024.
6. EDWIGES, T. *et al.* **Comparison of various pretreatment techniques to enhance biodegradability of lignocellulosic biomass for methane production**. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019, vol. 7, no 6, p. 103495. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343719306189>. Acesso 23 abril 2024.
7. LALANDER, C. *et al.* **Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia Illucens*)**. J Clean Prod. 2019, v. 208, p. 211-219. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618330257>. Acesso 23 abril 2024.
8. LIU, G. *et al.* **Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes**. Bioresource Technology. 2009, v. 100, p. 5103-5108. Disponível em : https://www.researchgate.net/publication/26334294_Effect_of_feed_to_inoculum_ratios_on_biogas_yields_of_food_and_green_wastes. Acesso 23 de novembro 2024.
9. PRABHUDESSAI, V. *et al.* **Biochemical Methane Potential of Agro Wastes**. Journal of Energy. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258392620_Biochemical_Methane_Potential_of_Agro_Wastes. Acessado 23 de novembro 2024.
10. RAPOSO, F.; DE LA RUBIA, M.A.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, F.; BORJA, R. **Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012, v. 16, n. 1, p. 861-877. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111004588>. Acesso 23 abril 2024.
11. SINGH, A.; KANCHAN, K. **An Inclusive Approach for Organic Waste Treatment and Valorization Using Black Soldier Fly Larvae: A Review**. Journal of environmental management. 2019, v. 251. Disponível em:

<https://www-sciencedirect.ez48.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301479719312873?via%3Dihub>

Acesso 18 abril 2024.

12. SOLARTE, T. J. C. *et al.* **Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio.** Revista ION. 2017, v. 30, n. 1, p.105-116. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2017000100105. Acesso 12 abril 2024.
13. VDI 4630, 2006. **Fermentation of organic materials: characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests.** In: Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Germany
14. VENEGAS VARGAS, M.A. **Producción de biogás a partir de los biosólidos provenientes del tratamiento de aguas servidas utilizando diferentes razones inóculo/sustrato.** 2014. Disertación (Licenciatura em Engenharia Ambiental) – Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3247/produccion_biogas_biosolidos_provenientes_tratamiento.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso 23 de novembro 2024.
15. ZHENG, Y. *et al.* **Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. Progress in energy and combustion science.** 2014, vol. 42, p. 35-53. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128514000021>. Acesso 23 abril 2024.